



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
ABDELKRIM KHALDI

Le : lundi 8 juillet 2019

Exploration du premier prototype de réfrigérateur solaire à adsorption charbon actif/méthanol dans la région de Biskra

Jury :

| | | | | |
|-----|-----------------|-----|----------------------|------------|
| Dr. | Salim MESSAOUDI | MCB | Université de Biskra | Président |
| M. | Miloud ZELLOUF | MAA | Université de Biskra | Rapporteur |
| Dr. | Chawki MAHBOUB | MCB | Université de Biskra | Examineur |

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

à ma chère mère et à mon chère père

Merci pour vos prières et vos encouragements et j'espère de tout mon cœur que

Dieu vous bénisse.

Je remercie mes frères qui m'ont aidé par leurs encouragements et en leurs

soutiens en particulier mon frère Nassim

Je remercie ma famille, tous mes amis et collègues du collège et tous ceux qui

ont contribué de près ou de loin.

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant pour la santé, la volonté, le courage et la patience qu'il m'a donné durant ces années d'étude.

Je tiens à remercier Mr. Milloud ZALLOUF pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci également au Dr. Kamel AOUES, qui a grandement contribué à ses conseils et direction, et aussi de soutien dans les moments les plus difficiles et matériel et moral, ainsi que ses conseils pour donner des idées et comment rédiger correctement le mémoire.

Je remercie également les jurys Dr. Salim MESSAOUDI et Dr. Chawki MAHBOUB, qui m'ont honoré de leurs présences pour juger mon travail.

Un grand merci également au responsable de Hall Technologique de l'université Mohamed Khider Biskra Mr. Ismail GUETTALA et le personnel.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les enseignants, intervenants et toutes les personnes par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et accepté de répondre à mes questions durant qui mes recherches, surtout les membres du Hall Technologique.

Je tiens à remercier en particulier Mr. Mohamed Aymen KETHIRI, Mr. Abbes OUAAR, Mr. Fateh BOUHAFS et Mr. Hossam DJAHARA pour leurs amitiés et leurs aides dans une ambiance chaleureuse et amical.

I) Sommaire

| | |
|--|-----|
| Dédicaces..... | |
| Remerciements..... | |
| Sommaire..... | I |
| Nomenclature..... | II |
| Liste des figures..... | III |
| Liste des tables..... | VI |
| | |
| Introduction générale..... | 1 |
| | |
| Chapitre 1 : Généralité et Recherche bibliographique | |
| 1.1. Introduction..... | 6 |
| 1.2. Historique..... | 6 |
| 1.3. Principes de l'adsorption..... | 8 |
| 1.4. Choix du couple Adsorbant/adsorbat..... | 8 |
| 1.4.1. Choix de l'adsorbant..... | 9 |
| 1.4.2. Choix de l'adsorbat..... | 10 |
| 1.4.2.1. Critère technique..... | 10 |
| 1.4.2.2. Critère écologique..... | 11 |
| 1.4.2.3. Critère économique (coût d'investissement et d'exploitation)..... | 11 |
| 1.5. Le couple charbon actif/méthanol..... | 12 |
| 1.6. Phénomènes d'adsorption..... | 13 |
| 1.7. L'adsorption chimique et physique..... | 15 |
| 1.7.1. L'adsorption chimique..... | 15 |
| 1.7.2. L'adsorption physique..... | 15 |
| 1.8. Critères de choix du couple adsorbant/adsorbat..... | 15 |

| | |
|--|----|
| 1.8.1. Choix du solide adsorbant..... | 15 |
| 1.8.2. Choix du fluide frigorigène..... | 16 |
| 1.8.3. Choix thermodynamique..... | 16 |
| 1.8.4. Choix technique et de sécurité..... | 16 |
| 1.8.5. Choix de sécurité..... | 17 |
| 1.9. Principe de fonctionnement et rappel de quelques notions théoriques.... | 17 |
| 1.9.1. Description d'une machine frigorifique à adsorption..... | 17 |
| 1.9.2. Cycle frigorifique à adsorption..... | 18 |
| 1.9.3. Définition des procédés thermochimiques d'adsorption..... | 18 |
| 1.9.3.1. Phase de chauffage..... | 19 |
| a. Phase de chauffage isostérique (7h-10h)..... | 19 |
| b. Phase de chauffage de désorption-condensation (10h-16h)..... | 20 |
| 1.9.3.2. Phase de refroidissement..... | 20 |
| a. Phase de refroidissement isostérique | 20 |
| b. Phase de refroidissement d'adsorption-évaporation (production du froid)..... | 21 |
| 1.9.4. Coefficients de performance thermique d'une machine frigorifique à adsorption..... | 22 |
| 1.10. Avantage et inconvénients des machines à adsorption..... | 23 |
| 1.10.1. Avantage..... | 23 |
| 1.10.2. Inconvénients..... | 23 |
| 1.11. Conclusion..... | 24 |
| Chapitre 2 : Description du dispositif expérimental | |
| 2.1. Introduction..... | 27 |
| 2.2. Description de la machine frigorifique à adsorption solaire..... | 27 |

| | |
|---|----|
| 2.2.1. Le capteur(l'adsorbeur)..... | 28 |
| 2.2.2. L'évaporateur..... | 32 |
| 2.2.3 la chambre froide | 32 |
| 1.11.1. Le condenseur..... | 33 |
| 1.12. Assemblage des différents éléments de l'installation frigorifique solaire... | 33 |
| 1.13. Les sous-éléments..... | 34 |
| 1.14. Opérations de vérification et de dégazage de l'installation frigorifique..... | 35 |
| 1.15. Conclusion..... | 36 |

Chapitre 3 : Résultats et discussions

| | |
|--|----|
| 3.1. Introduction..... | 39 |
| 3.2. Résultats expérimentaux..... | 39 |
| 3.2.1. Description de l'installation avant le début des expériences..... | 39 |
| 3.2.2. Début et déroulements des expériences..... | 40 |
| 3.3. Données météorologiques du site..... | 40 |
| 3.3.1. Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante..... | 40 |
| 3.3.2. Variation de la vitesse du vent..... | 41 |
| 3.4. Les Températures des différents éléments de l'installation..... | 42 |
| 3.4.1. Evolution de la température l'adsorbeur | 42 |
| 3.4.2. Evolution des températures de l'évaporateur et celle de l'ambiance... | 43 |
| 3.4.3. Evolution des températures du condenseur et celle de l'ambiance..... | 44 |
| 3.4.4. Evolution despressions..... | 45 |
| Conclusion générale..... | 48 |
| Résumé..... | 49 |

II) NOMENCLATURE

P_e : pression d'évaporation.

P_c : pression de condensation.

T_s : température de condensation.

T_{max} : température maximale.

T_{min} : température minimale.

T_e : température d'évaporation.

T_a : température d'adsorption.

T_g : température de régénération.

T_c : température de condensation.

n : le nombre de couche moléculaire d'adsorbat.

X : la pression relative.

P : la pression d'équilibre.

P_s : la pression de saturation de l'adsorbat liquide.

m : la masse adsorbée de l'adsorbat.

m_0 : la masse d'adsorbat nécessaire pour former une couche mono-moléculaire.

C : est une constante caractéristique du gaz.

ΔH_{ads} : la chaleur d'adsorption de la première couche.

ΔH_{con} : la chaleur de condensation de l'adsorbat.

W : le volume occupé par la phase adsorbée.

W_0 : le volume maximal adsorbable.

β : le coefficient d'affinité.

K : une constante caractéristique de la distribution des pores de l'adsorbant.

A_i : le potentiel d'adsorption de Polanyi.

D : une constante qui caractérise le couple adsorbant/adsorbat.

f_s : les fugacités de l'adsorbat de l'état saturé.

f : les fugacités de l'adsorbat de l'état d'équilibre.

n : un paramètre ajustable, permettant d'améliorer la corrélation des données expérimentales

ΔS : l'entropie.

α : le coefficient d'expansion thermique de l'adsorbat liquide.

COP_{th} : le coefficient de performance.

Q_f : la production frigorifique ou la quantité de froid produite à l'évaporateur.

Q_c : la quantité de chaleur fournie à l'adsorbeur.

L(T) : la chaleur latente d'évaporation.

Cp(T) : la chaleur spécifique de l'adsorbat à l'état liquide.

m_a : la masse d'adsorbant solide contenue dans l'adsorbeur.

Δ_m : la masse cyclée de l'adsorbat, qui calculée comme suit.

m_{max} : la masse adsorbée correspondante à la température d'adsorption T_a et la pression d'évaporation P_e.

m_{min} : la masse adsorbée correspondante à la température de régénération T_g et la pression de condensation P_c.

Cp : la chaleur spécifique à pression constante.

Cv : la chaleur spécifique à volume constante

Cp₂ : la chaleur spécifique de l'adsorbant et m_a Cp₂ représente la capacité calorifique de l'adsorbant.

m_g : la masse des parties métallique de l'adsorbeur.

Cp_w : la chaleur spécifique des parties métallique de l'adsorbeur.

m_g Cp_w ; la capacité calorifique des parties métallique de l'adsorbeur.

m (T) : la masse adsorbée à la température T et à la pression de condensation P_c, phase (B-E).

T_{s1} : la température de désorption.

q_{st} : la chaleur isostérique d'adsorption, définie par équation.

dm : la différentiation de la masse adsorbée.

ρ : masse volumique (kg/m³).

III) Liste des figures

| Les figures | Page |
|--|-------------|
| Figure 1.1. Phénomène d'adsorption. | 14 |
| Figure 1.2. Schéma d'une machine frigorifique solaire à adsorption. | 17 |
| Figure 1.3. Diagramme de Clapeyron pour une machine frigorifique à adsorption. | 18 |
| Figure 1.4. Allure schématique des isobares d'adsorption. | 19 |
| Figure 1.5. Schéma d'un réseau d'isostères adsorption. | 19 |
| Figure 1.6. Phase de chauffage isostérique. | 19 |
| Figure 1.7. Phase de chauffage de désorption. | 20 |
| Figure 1.8. Phase de refroidissement isostérique. | 21 |
| Figure 1.9. Phase de refroidissement d'adsorption | 21 |
| Figure 2.1. Machine frigorifique solaire à adsorption méthanol/charbon actif. | 27 |
| Figure 2.2. Capteur parallélépipédique remplacé. | 28 |
| Figure 2.3. Tubes internes. | 29 |
| Figure 2.4. Opération de perforation des tubes internes. | 29 |
| Figure 2.5. Tube externe de 42 mm de diamètre. | 29 |
| Figure 2.6. Pièces (1), (2), (3) de raccordement. | 30 |
| Figure 2.7. Les coudes femelle-femelle 90° (4) et Té égal (5). | 30 |
| Figure 2.8. Procédé de soudage. | 30 |
| Figure 2.9. Soudage du premier coté et remplissage de charbon actif. | 30 |
| Figure 2.10. Les neuf tubes assemblés. | 31 |
| Figure 2.11. Le processus de coloration. | 31 |
| Figure 2.12. Fixation de la couverture transparente. | 31 |
| Figure 2.13. L'évaporateur. | 32 |
| Figure 2.14. La chambre froide. | 32 |

| | |
|--|-----------|
| Figure 2.15. Le condenseur. | 33 |
| Figure 2.16. Emplacements des vannes. | 34 |
| Figure 2.17. Le réservoir. | 34 |
| Figure 2.18. Le vaccumètre. | 34 |
| Figure 2.19. Pompe à vide. | 34 |
| Figure 2.20. Vieux capteur déformé. | 35 |
| Figure 2.21. l'ancien condensateur déformé. | 35 |
| Figure 3.1. Installation Frigorifique solaire. | 39 |
| Figure 3.2. Evolution du rayonnement solaire et de la température ambiante de jour de test. | 41 |
| Figure 3.3. Variation de la vitesse du vent. | 41 |
| Figure 3.4 Evolution de la température de l'adsorbeur durant la journée de test. | 42 |
| Figure 3.5. Variations la température de l'évaporateur et celle de l'ambiance. | 43 |
| Figure 3.6. Variations des températures du condenseur et celle de l'ambiance | 44 |
| Figure 3.7. Variation des pressions du capteur et de l'évaporateur en fonction du temps. | 45 |

VI) Liste des tables

| Les tableaux | Page |
|---|-----------|
| Tableau 1.1. Surface spécifique de différents adsorbants selon L. M. Sun et F. Meunier. | 10 |
| Tableau 1.2. Propriétés thermodynamiques de l'eau, de l'ammoniac et du méthanol. | 11 |

Introduction générale

Introduction Général

Pendant de nombreuses années, les systèmes frigorifiques à compression de vapeur d'habitude exploités avec des réfrigérants synthétiques, tels que les CFC, HCFC ou HFC. Lorsqu'ils sont libérés dans l'atmosphère, ces fluides frigorigènes appauvrissent la couche d'ozone et / ou contribuent à l'effet de serre.

Les cycles de réfrigération à compression de vapeur d'habitude sont alimentés électriquement, ils consomment de grandes quantités d'énergie de haute qualité, ce qui augmente considérablement la consommation d'énergie fossile ; et aussi largement contribuer à l'effet de serre.

Dans une autre perspective, un pourcentage considérable de la population mondiale habite dans des zones reculées où l'approvisionnement en électricité est rare, déficiente ou même inexistante, et il est estimé à poursuivre au cours des prochaines décennies. La nécessité de systèmes de réfrigération dans ces emplacements est d'une extrême importance car, en raison de la pénurie de l'électricité, de l'équipement de réfrigération conventionnel ne peut être utilisé, par exemple, pour les aliments et les médicaments, la fabrication de glace ou encore la climatisation.

Par conséquent, la prise de conscience sur des questions telles que la diminution des ressources en combustibles fossiles (avec les prix croissants de l'énergie), les graves problèmes environnementaux ou encore les défis de localisation (par exemple, zones éloignées) nécessite le développement de nouvelles technologies et a conduit l'humanité à regarder avec plus d'intérêt les sources d'énergie écologiques et renouvelables. Ceux-ci comprennent le vent, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, la biomasse et les énergies géothermiques, ou même les déchets thermiques à partir de différents processus.

Le froid solaire désigne l'ensemble des techniques de production du froid utilisant l'énergie solaire comme ressource énergétique primaire. Il existe théoriquement 4 moyens de produire du froid à partir de l'énergie solaire :

- Utiliser le solaire photovoltaïque pour alimenter un climatiseur traditionnel en électricité.
- Convertir l'énergie solaire thermique en énergie mécanique couplée avec un climatiseur à compression.
- Utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter une machine couplée avec un climatiseur à compression.
- Utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter un système de conditionnement d'air par évaporation.

La réfrigération par adsorption solaire est l'un des procédés le plus utilisé, précisément au laboratoire d'énergie solaire, qui a un grand nombre de publications à son sujet, la plupart d'entre eux décrivant la construction, le test de systèmes développés comme des prototypes en fonction des couples de travail les plus courants.

Ce travail est un projet d'étude et de réalisation d'une machine frigorifique à adsorption représente la suite du projet de fin d'étude d'ingénieur préparé par H.GUIREN et A. NESBAH et dirigé par le Pr. Adel BENCHABANE, soutenu en Juin 2011[1]. D'où ils ont fait une reproduction à travers une compréhension de la machine frigorifique solaire construite par le Dr. Abdelmoussehel ERROUGANI, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Agdal, Rabat, Maroc, Juin 2007. Ils ont pu construire le socle supportant tous les éléments, la boîte en bois du capteur, la réalisation de l'évaporateur et le condenseur à base de tôle en acier galvanisé sans avoir assemblé le tous ou tester l'un d'eux. Par la suite et durant les années universitaires 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 et sous la direction du Dr. Kamel AOUES a repris le sujet. En 2017/2016, Amel GUERROUF a finis de réaliser tous les éléments de la machine et leurs assemblage et tests [2]. L'année qui suit, Ayoub NOUADJI a essayé de trouver des solutions aux problèmes rencontrés [3].

Cette installation frigorifique solaire se compose de trois éléments essentiels : le capteur/adsorbeur, le condenseur et l'évaporateur. Ces éléments ont été réalisés et assemblés au hall technologique du département de Génie mécanique, faculté des Sciences et de la Technologie de l'université Mohamed Khider, Biskra. Sous les conditions énergétiques et climatiques de l'université de Biskra, nous avons procédé aux tests de la machine.

Notre travail est constitué de trois chapitres suivants :

Le premier chapitre expose technologie de la production de froid solaire d'une manière générale ; dans lequel on trouve les différentes technologies (photovoltaïque et thermique) de réfrigération qui se base sur plusieurs techniques (classique, à absorption, à adsorption,..). On expose aussi quelques notions théoriques telle que le coefficient de performance.

Le deuxième chapitre présente une description détaillée des étapes de réalisation et d'assemblage de notre installation frigorifique solaire.

Enfin dans le troisième chapitre, on expose les différentes courbes qui résument les résultats expérimentaux enregistrés lors des tests. Et pour finir une conclusion générale et des perspectives sur ce travail.

Chapitre 1

Généralité et Recherche bibliographique

Chapitre 1 : Généralité et Recherche bibliographique

- 1.1. Introduction**
- 1.2. Historique**
- 1.3. Principes de l'adsorption**
- 1.4. Choix du couple Adsorbant/adsorbat**
- 1.5. Le couple charbon actif/méthanol**
- 1.6. Phénomènes d'adsorption**
- 1.7. L'adsorption chimique et physique**
- 1.8. Critères de choix du couple adsorbant/adsorbat**
- 1.9. Principe de fonctionnement et rappel de quelques notions théoriques**
- 1.10. Avantage et inconvénients des machines à adsorption**
- 1.11. Conclusion**
- 1.12. Références**

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les différents phénomènes nécessaires à l'étude de l'adsorption dans le but de définir quelques concepts généraux qui sont utilisés dans notre étude. Aussi une description du principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption.

1.2. Historique

Dans le domaine de la réfrigération solaire par adsorption, divers modules de réfrigération par adsorption ont été développés. Dans ce qui suit, on donne un bref aperçu de la littérature sur quelques travaux importants réalisés sur ce sujet.

Lu et Wang (2014) ont conçu et estimé la performance d'un petit système de refroidissement solaire à adsorption utilisant le couple silicagel/eau. Le refroidisseur a été testé expérimentalement aux températures de génération variant de 60 à 85 °C. Les résultats expérimentaux indiqués la capacité de refroidissement variait de 13 à 21 KW et le froid brut de COP a atteint 0.15 [4].

Berdja et al. (2014) Construit un prototype de petit réfrigérateur qui utilise une paire de travail à charbon actif et méthanol, dans laquelle l'énergie solaire peut être directement utilisée. Le COP solaire a été trouvé être égal à 0.081 en fonction de l'effet réfrigérant et le rayonnement solaire [5].

Lemmini et Errougani (2007) ont construit et testé une adsorption solaire système de réfrigération utilisant du charbon actif AC35 et méthanol comme la paire de travail. Résultats des tests à rabat site au Maroc a montré que la COP solaire variait de 0.04 à 0.08 [6].

Hildbrand et al. (2004) développé et testé une adsorption solaire système de réfrigération avec 78.8 kg d'eau silicagel (Hildbrand et al, 2004). Le réfrigérateur à adsorption exploité dans les conditions météorologiques d'Yverdon-les-Bains, Suisse. Les résultats expérimentaux ont montré la température minimale de l'évaporateur a atteint 0°C et la COP solaire variait de 0,10 à 0,22 [7].

Pan et al.(2014) développé et testé un nouveau prototype de réfrigérateur travailler avec du chlorure de calcium-charbon actif et réfrigérant à l'ammoniac. Les résultats expérimentaux montrent que la température minimale de l'évaporateur atteinte 5°C, 1,64 KW de capacité de refroidissement, et le coefficient optimal de performance était de 0,19 [8].

Lu et al conçu un nouveau refroidisseur d'adsorption de caloduc avec 65 kg de gel silice. Le système de réfrigérateur à adsorption exploité dans les conditions météorologiques

de Dezhou, Chine. Les résultats expérimentaux ont montré que la capacité de refroidissement et le COP solaire moyenne était de 17,6 KW et 0,16, respectivement (Lu et al, 2013) [9].

Leite et al. Ont (2007) construit un système de réfrigération par adsorption solaire qui utilisait un adsorbant tubulaire avec du méthanol à charbon actif comme la paire de travail, et testé dans la météorologie conditions du Brésil. Les résultats expérimentaux ont indiqué que la COP solaire maximale atteint 0,085 (Leite et al, 2007) [10].

En outre, il existe également des études basées sur l'expérimentation des systèmes de réfrigération par adsorption solaire pour améliorer cette technologie. Cette recherche s'est concentrée sur différents aspects : développer et tester un nouveau composite système d'adsorption par refroidissement à lit adsorbant (Solmus et al, 2011 ; Li et al, 2013 ; Yan et al, 2014 ; Wang et al, 2014), et pour améliorer la performance de l'adsorption de refroidissement machine (Luo et al, 2010 ; Chang et al, 2009 ; Wang et al, 2015 ; Lu et al, 2013) [11-18].

En outre, pour améliorer l'efficacité du refroidissement solaire dispositifs d'adsorption, certaines étudié ont porté sur l'optimisation la conception du capteur solaire: Zhao et al. Ont conçu et étudié d'un refroidissement par adsorption solaire à l'épreuve du gel système utilisant un lit d'adsorbant tubulaire avec un mélange charbon actif-méthanol paire. Les résultats expérimentaux ont montré que valeurs de rayonnement solaire variant de 15,3 à 17,1 MJ, la conception de collecteur solaire peut fournir une température de 110°C dans le lit d'adsorbant, et un système de COP maximum était 0,11 (Zhao et al, 2008) [19].

Hamdeh et Al-Muhtaseb (2010), ont étudié expérimentalement nouveau prototype d'un système d'adsorption à refroidissement solaire en utilisant du charbon actif et du méthanol comme la paire de travail. Résultats expérimentaux avec une technique statistique démontré que l'augmentation de la masse d'adsorbant a augmenté la performance (Hamdeh et Al-Muhtaseb, 2010) [20].

El Fadar (2015) a étudié théoriquement l'influence d'un collecteur d'adsorbant à ailettes sur la performance d'un capteur solaire système d'adsorption de refroidissement. Le modèle théorique a été validé avec des données expérimentales. Analyse des résultats indiqué que la performance du système dépendait du nombre d'ailettes, il a augmenté lorsque le nombre d'ailettes augmenté (El Fadar, 2015) [21].

Ji et al. (2014) ont conçu et testé une nouvelle adsorption solaire système de réfrigération qui utilise un charbon actif-méthanol paire de travail avec un nouveau design pour l'adsorbant tubulaire lit afin d'améliorer le transfert de chaleur et de masse dans le lit

d'adsorbant. Les résultats expérimentaux ont indiqué que la température minimale de l'évaporateur a atteint 0 °C la COP solaire variait de 0,039 à 0,12 (Ji et al, 2014) [22].

1.3. Principes de l'adsorption

L'adsorption est le processus au cours du quelles molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé adsorbat dans le cas général ou réfrigérant dans les procédés de production de froid, se fixent sur la surface d'un solide appelé un adsorbant.

Le terme surface du solide correspond à la totalité des surfaces externe engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'adsorbant. Quand une molécule s'approche d'une surface solide, elle peut se fixer de deux manières :

- Soit par l'adsorption chimique ou chimie-sorption correspondant à des liaisons chimiques fortes chimiques fortes dont l'énergie de liaison est assez grande de l'ordre de 50 à 400 kJ/mole se traduisant par une réaction chimique entre les molécules du fluide « adsorbat » et la surface du solide « adsorbant », c'est un phénomène irréversible.
- Soit par l'adsorption physique ou physisorption correspondant à des liaisons physique plus faible, avec des énergies d'interactions de l'ordre 20 kJ/mole qui ne modifie pas la nature chimique de la molécule de l'adsorbant. Cette fixation des molécules du fluide sur la surface du solide se fait essentiellement par les forces de Van der Waalset les forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation, dipôle et quadripôle pour les adsorbants ayant une structure ionique. Cette liaison faible de molécules d'adsorbat sur le solide n'entraîne aucune modification de la structure moléculaire du solide mais une simple variation de sa masse. Ainsi, l'adsorption physique est parfaitement réversible c'est-à-dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées en augmentant la température. Les procédés d'adsorption industriels notamment la réfrigération font inter venir généralement les propriétés de la réversibilité de l'adsorption physique. Par conséquent, seule l'adsorption physique sera abordée dans ce travail [23].

1.4. Choix du couple Adsorbant/adsorbat

Il est largement identifié que l'un des problèmes les plus significatifs dans la conception d'une machine frigorifique à adsorption est le choix du couple adsorbant/adsorbat approprié. En effet, plusieurs couples ont été utilisés dans ce genre de machines. Cependant, la sélection de ces derniers est essentielle car l'efficacité de la machine dépend de certaines

caractéristiques physiques et chimiques prépondérantes, telles les conditions thermodynamiques (température et pression, ...etc.), la complexité dans la manipulation et les soucis environnementaux ...etc.

Tant que le couple adsorptif est composé d'un adsorbant et adsorbat, une étude séparée de chaque partie du couple est nécessaire.

1.4.1. Choix de l'adsorbant

Le choix de l'adsorbant dans l'étude du phénomène d'adsorption est vaste, mais peut être limité dans le domaine de la réfrigération solaire à adsorption par certains critères, citons

- Les corps utilisés en tant qu'adsorbants sont des matériaux poreux ou microporeux qui présentent une très grande surface spécifique. A titre d'exemple, les charbons actifs présentent une surface spécifique de l'ordre de 400 à 2000m²/g. Le tableau 1.1 donne la surface spécifique de différents adsorbants utilisés dans l'adsorption selon la classification de L. M. Sun et F. Meunier [24].
- L'adsorbant doit avoir une grande capacité d'adsorption à la température ambiante et basse pression, mais une faible capacité d'adsorption à la température maximum du système et haute pression pour obtenir une grande quantité de production du froid.
- Il doit posséder une bonne conductivité thermique.
- Il doit avoir une faible chaleur spécifique.
- Il faut que l'adsorbant soit chimiquement compatible avec l'adsorbat choisi et aille des
- pores de dimensions proches à celle des molécules de l'adsorbat.
- Il doit être non toxique et non corrosif.
- Ne présentant aucune détérioration avec le temps et l'usage.
- Et présentant un coût abordable en étant largement disponible.

Les considérations précédentes justifient donc le choix porté dans la majorité des travaux effectués jusqu'à maintenant, sur les adsorbants suivants: les zéolites, les charbons actifs, les gels de silice et les alumines activées, ...etc. Ces adsorbants sont soit des corps naturels, soit améliorés par un traitement qui a pour effet d'augmenter leur surface spécifique, ou bien des corps artificiels dont certains ont une composition et une structure voisines de celles des corps naturels.

| Adsorbant | Surface spécifique (m ² /g) |
|---------------------------------|--|
| - Charbons actifs | - 400 à 2000 |
| - Tamis moléculaires carbonés | - 300 à 600 |
| - Zéolites | - 500 à 800 |
| - Gels de silice | - 600 à 800 |
| - Alumines activées | - 200 à 400 |
| - Adsorbants à base de polymère | - 100 à 700 |

Tableau 1.1. Surface spécifique de différents adsorbants selon L. M. Sun et F. Meunier [24].

1.4.2. Choix de l'adsorbat

L'autre partie du couple est l'adsorbat (ou le réfrigérant). L'identification et le choix de ce dernier sont basés sur trois critères (technique, écologique et économique) :

1.4.2.1. Critères techniques

Le choix de l'adsorbat est dicté par un ensemble des contraintes techniques (pression, propriétés thermodynamiques et sécurité) suivantes:

- Posséder une grande chaleur latente d'évaporation.
- Avoir une faible viscosité.
- Avoir une grande conductivité thermique.
- être constitué de petites molécules facilement adsorbables.
- Avoir une chaleur spécifique la moins élevée possible.
- Avoir la composition chimique stable dans les conditions de fonctionnement de la machine.
- être compatible avec le matériau de construction de la machine.
- N'ayant pas d'effet sur les denrées à conserver dans le cas de la congélation et la réfrigération.
- être sans toxicité.
- être ininflammable et non explosif en mélange avec l'air.
- Et sa pression doit être supérieure à la pression atmosphérique pour éviter des problèmes techniques tels que les fuites [24].

1.4.2.2. Critères écologiques

L'utilisation et la fabrication des adsorbats doivent être réalisées sans aucun effet négatif sur l'environnement. À titre d'exemple: l'utilisation des CFC est interdite. Des HCFC et des HFC sont soumises à une réglementation de plus en plus sévère du fait de leur contribution à l'effet de serre. D'autres recherches s'orientent vers le développement de nouveaux fluides frigorigènes possédant une efficacité énergétique intéressante tout en restant neutres vis-à-vis de l'environnement [24].

1.4.2.3. Critères économiques (coût d'investissement et d'exploitation)

Selon l'offre et la demande, il convient de dire que l'adsorbat a un coût raisonnable du fait de sa disponibilité à l'échelle industrielle.

Les différents critères et propriétés cités ci-dessus sont techniquement contradictoires car l'amélioration d'une caractéristique entraîne souvent la détérioration d'une autre. Jusqu'à maintenant, l'adsorbat qui réunit toutes ces conditions n'existe pas pratiquement. Néanmoins, il y a des adsorbats qui satisfont à un nombre élevé de ces conditions et ce en fonction des besoins spécifiques en froid. Parmi eux nous citons : l'eau, l'ammoniac et le méthanol. On présente ci-dessous quelques caractéristiques de ces adsorbats:

| Réfrigérant | Température (°C) | Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg) | Pression vapeur (bar) |
|-------------|------------------|---|-----------------------|
| EAU | 0 | 2485 | 0.0063 |
| | 20 | 2442 | 0.0236 |
| | 40 | 2397 | 0.0747 |
| Ammoniac | -30 | 1359 | 1.195 |
| | -10 | 1296 | 2.909 |
| | 0 | 1262 | 4.294 |
| | 30 | 1146 | 11.665 |
| Méthanol | -50 | 1190 | 0.01 |
| | -10 | 1182 | 0.04 |
| | 30 | 1155 | 0.25 |

Tableau 1.2. Propriétés thermodynamiques de l'eau, de l'ammoniac et du méthanol [25].

L'eau: (H₂O) est un frigorigène parfaitement sûr pour l'homme, disponible, a des bonnes propriétés thermiques et sa pression de fonctionnement est faible (20 mbar-80 mbar). Sa gamme de température de production de froid est réduite (0 °C, 10 °C), qui ne peut être utilisée dans des applications de congélation. Mais elle est bien adaptée pour la climatisation. Toutefois, l'eau reste un fluide « idéal » d'un point de vue toxicité et environnement.

L'ammoniac : (NH_3) ce fluide frigorigène présente une chaleur latente d'évaporation et une conductivité thermique élevées, sa pression de fonctionnement est élevée (0.5 bar - 5 bar) supérieure à la pression atmosphérique, ce qui peut être retenu comme avantage. La gamme de température de production de froid est importante (-50 °C, 10 °C). Cependant, il est très dangereux, formant avec l'air un mélange explosif et peut former une certaine réaction chimique avec les matériaux de construction de la machine tel que le cuivre. Donc, il nécessite pour son emploi l'utilisation des matériaux résistants comme l'acier inoxydable.

Le méthanol : (CH_3OH) est un frigorigène agréable, il possède les propriétés suivantes :

- La gamme de température de production de froid est (-15 °C, 10 °C).
- Sa chaleur latente d'évaporation est haute et égale presque à la moitié de celle de l'eau.
- Ses molécules sont petites (4 Å) pouvant être facilement adsorbées dans les micropores de diamètre plus petit que 20 Å.
- Son point d'ébullition (~ 65 °C à pression 01atmosphère) est beaucoup plus haut que la température ambiante.

Cependant, il a quelques inconvénients tels que :

- Sa décomposition à des températures supérieures à 150°C ce qui impose une prise de précautions pour son utilisation dans des applications solaires.
- Sa pression de son fonctionnement est faible (5 mbar -100 mbar), est inférieure à la pression atmosphérique, ce qui nécessite des équipements spéciaux pour éviter les fuites.
- Son niveau de toxicité est élevé et sa forte odeur.
- Son inflammabilité. Il brûle dans l'air en formant du dioxyde de carbone et de l'eau[24].

1.5. Le couple charbon actif/méthanol

Le charbon est dit "actif" parce que l'on a créé une porosité à l'intérieur du charbon grâce à de l'acide phosphorique ou de la vapeur d'eau. Ce qui est différent de la zéolithe qui est dite "activée" lorsque l'eau est désorbée. Les charbons actifs sont des carbones que l'on a préparé afin d'accroître leur pouvoir adsorbant. En effet ils peuvent être obtenus à partir d'un grand nombre de matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétroliers, etc.), par des processus de carbonisation suivis des processus d'activation dument contrôlés [26].

Le charbon actif ou charbon activé est une poudre noir, légère, très salissante, constituée essentiellement de matière carbonée à structure microporeuse. C'est, en fait, une sorte de

charbon de bois présentant une très grande surface spécifique qui lui confère un fort pouvoir adsorbant. La surface développée par le charbon actif est élevée : un gramme de charbon actif a une surface spécifique comprise entre 400 et 2000 m² (Tableau 1.1). Il est hydrophobe [26].

L'adsorption des gaz nécessite des pores de 1 à 2 nm, alors que des pores de 2 à 10 nm suffisent pour l'adsorption des liquides.

Le méthanol (CH₃OH) est un gaz toxique, incolore, et alcalin. Dans des conditions de température et de pression normale, la chaleur latente d'évaporation est importante et est presque égale à la moitié de celle de l'eau et son point d'ébullition est d'environ 65°C. Sa gamme de température pour produire le froid est comprise entre -15°C et 10°C, ce qui en fait un fluide frigorigène intéressant. Les molécules de ce fluide sont petites, de l'ordre de 4 Å, fonctionnement est faible (5 mbar à 100 mbar), comme l'eau, le méthanol nécessite des équipements spéciaux pour éviter les entrées d'air extérieur [26].

Tout comme la zéolithe, le charbon actif est très présent dans le domaine de la production du froid. Il se présente sous forme de poudre de 15 à 25 particules par µm, granulés tamisés de 4 à 20 mailles, soit environ 0.3 mm à 0.8 mm de diamètre ou granulés extrudés de 4 à 6 mm de longueur et fibres. L'énergie de liaison adsorbat/adsorbant est généralement plus faible pour le charbon actif que pour les autres adsorbants, ce qui diminue la quantité d'énergie nécessaire pour la phase de régénération [26].

Le charbon actif présente une faible sélectivité (capacité à séparer deux composés) par rapport aux autres adsorbants, du fait de sa large distribution de tailles de pores. Cependant cette grande distribution permet d'adsorber de nombreuses espèces chimiques, et en particuliers beaucoup de composés organiques volatils [26].

1.6. Phénomènes d'adsorption

Fantana et Schelle ont découvert le phénomène d'adsorption en 1711. Ce phénomène (figure 1.1) rend compte de la fixation de molécules de gaz (espèce adsorbable ou adsorbat) sur la surface du solide (adsorbant) au moyen de l'augmentation de la concentration des molécules de ce gaz à la surface du solide par rapport à la quantité totale initiale du gaz, sans modifier le volume de l'adsorbant.

Ce phénomène dépend quantitativement des propriétés physiques (porosité, surface spécifique) et chimique (acidité) et de la nature des molécules adsorbées.

Au cours de l'adsorption, le gaz ne subit pas de transformation chimique, le solide conserve son intégrité physique et son architecture cristallographique, en particulier il n'y a pas de gonflement du solide.

Ce phénomène s'accompagne d'un dégagement de chaleur s'appelle chaleur isostérique d'adsorption. Il met en jeu deux types d'interactions (figure 1.1):

- Les interactions adsorbant/adsorbat (entre le solide et les molécules adsorbées).
- Les interactions adsorbat/adsorbat (entre les différentes molécules adsorbées).

L'adsorption est déjà utilisée dans un certain nombre de processus physiques et industriels, en particulier dans le domaine de la filtration et de la purification des gaz, de l'affinage des eaux potables et dans les cycles de réfrigération.

L'adsorption d'un gaz par un solide comporte trois phases (figure 1.1) :

- La phase gazeuse constituée des molécules de gaz.
- La phase adsorbée (l'adsorbat) formée des molécules adsorbées à la surface.
- La phase solide qu'est l'adsorbant.

Le processus inverse, par lequel les molécules adsorbées sur la surface du solide s'en détachent, notamment sous l'action de l'élévation de la température, se nomme la désorption, ce dernier se traduit par la diminution de la concentration des molécules de gaz à la surface par rapport à la concentration totale du gaz adsorbé. Ce processus est endothermique, car le solide libère le gaz lorsqu'on lui apporte de la chaleur [27].

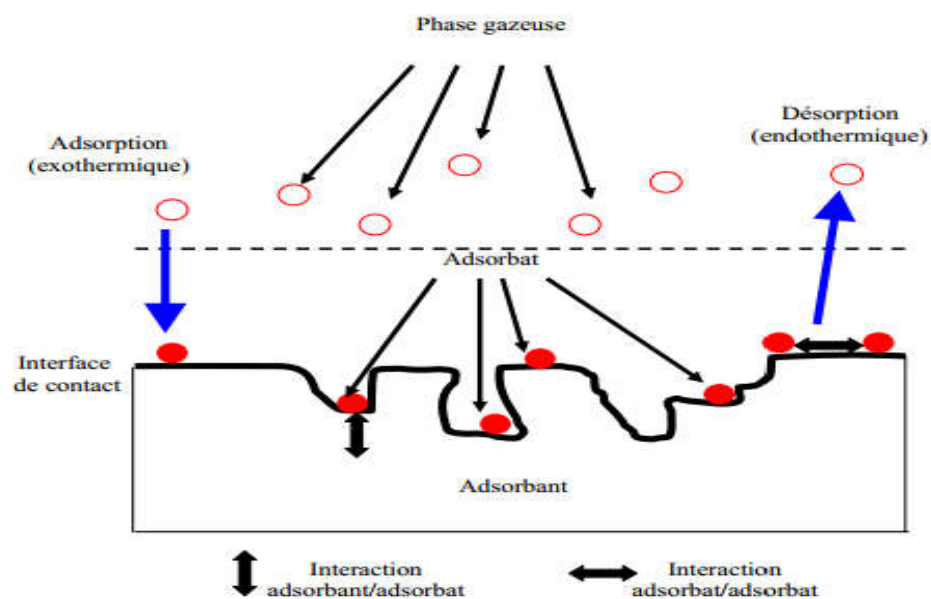


Figure 1.1. Phénomène d'adsorption [24].

1.7. L'adsorption chimique et physique

Quand une molécule s'approche d'une surface solide, elle peut se fixer de deux manières :

- Par l'adsorption chimique,
- Par l'adsorption physique.

1.7.1. L'adsorption chimique

Dans le cas de l'adsorption chimique, le processus résulte d'une réaction chimique avec formation des liens chimiques entre les molécules d'adsorbat et la surface de l'adsorbant, donnant naissance à des forces de liaisons très importantes (c'est pourquoi le phénomène est appelé chimisorption). La chaleur d'adsorption mise en jeu est en général assez grande, dépassant les 80 KJ/mole. L'adsorption chimique est souvent irréversible (ou difficilement réversible) et favorisée par une haute température [28].

1.7.2. L'adsorption physique

Dans le cas de l'adsorption physique, la fixation des molécules d'adsorbat sur la surface d'adsorbant se fait essentiellement par les forces de liaisons faibles du type Van Der Waals. Elle se produit sans modification de structure moléculaire, mettant en jeu une chaleur d'adsorption assez faible (de l'ordre de 5 à 25 KJ/mole), parfaitement réversible et qui est en outre favorisée par une basse température [28].

1.8. Critères de choix du couple adsorbant/adsorbat

Les critères de choix d'un couple solide-gaz sont les suivants:

1.8.1. Choix du solide adsorbant

Les adsorbants sont souvent choisis en fonction de leurs capacités d'adsorption et leurs fortes conductivités thermiques. La capacité d'adsorption doit être plus élevée à la basse température et à la pression d'équilibre dans l'évaporateur. Au contraire, elle doit être faible à la température élevée du cycle associée à la pression d'équilibre dans le condenseur.

Comme l'adsorption est un phénomène surfacique, le choix se porte sur l'adsorbant microporeux de plus grande surface spécifique (charbons actifs, zéolithes, gel de silice et alumines activées).

1.8.2. Choix du fluide frigorigène

Le choix de l'adsorbat est fait de sorte qu'il doit:

- avoir une forte chaleur latente de vaporisation.
- Etre facilement adsorbable à basse température et plus difficilement adsorbable à haute température.
- Les adsorbants couramment utilisés dans les systèmes à adsorption peuvent être classés par ordre décroissant de la chaleur latente de vaporisation. Il s'agit de l'eau, l'ammoniac et les alcools primaires (méthanol, éthanol)[25].

1.8.3. Choix thermodynamique

Ce choix doit prendre en considération :

- Les températures d'ébullition et de condensation du frigorigène qui doivent être voisines des températures externes du cycle de fonctionnement de la machine correspondant respectivement à la haute et à la basse pression du système.
- La température critique du frigorigène qui doit être la plus élevée possible.
- La chaleur isostérique de désorption, qui est la quantité d'énergie nécessaire pour rompre les liaisons réversible entre les molécules d'adsorbat (frigorigène) et la surface de l'adsorbant, qui doit être la plus faible possible.
- L'adsorbant qui doit avoir une chaleur spécifique massique la moins élevée possible.
- Le fluide frigorigène qui doit avoir une tension superficielle et une viscosité les moins élevées possible [25].

1.8.4. Choix technique et de sécurité

Pour une meilleure fiabilité du système, le choix technique doit prendre en considération:

- la stabilité chimique du couple sur tout à haute température de fonctionnement.
- la corrosion qui peut être due à la réactivité du couple avec les matériaux des composants et de canalisations de la machine.
- la solidification du frigorigène à basse température.
- la toxicité des fluides et l'inflammabilité des matériaux utilisés.

Ces deux derniers critères sont, entre autres, les causes de vieillissement du couple et le facteur déterminant de la durée de vie du système[25].

1.8.5. Choix de sécurité

Dans le choix de sécurité, deux paramètres fondamentaux sont à respecter:

- la toxicologie de chacun des éléments du couple (contrainte écologique).
- L'inflammabilité des éléments de la machine [25].

1.9. Principe de fonctionnement et rappel de quelques notions théoriques

1.9.1. Description d'une machine frigorifique à adsorption

Le réfrigérateur solaire est un système fermé constitué des composants suivant:

- ❖ Un adsorbent : Contenant l'adsorbant solide, en contact avec une source chaude (capteur solaire adsorption du rayonnement) qui a le même rôle de compresseur dans le cycle à compression de vapeur.
- ❖ Un condenseur : Est en contact avec une source intermédiaire dans lequel le réfrigérant se condense à la pression de condensation.
- ❖ Un réservoir : Qui sert à stocker le réfrigérant liquide provenant du condenseur.
- ❖ Un évaporateur : Est en contact avec une source froide, dans lequel le réfrigérant se vaporise à pression d'évaporation.
- ❖ Deux Clapet : anti-retour V_1 et V_2
- ❖ Un Vanne de détente V_3 [24].

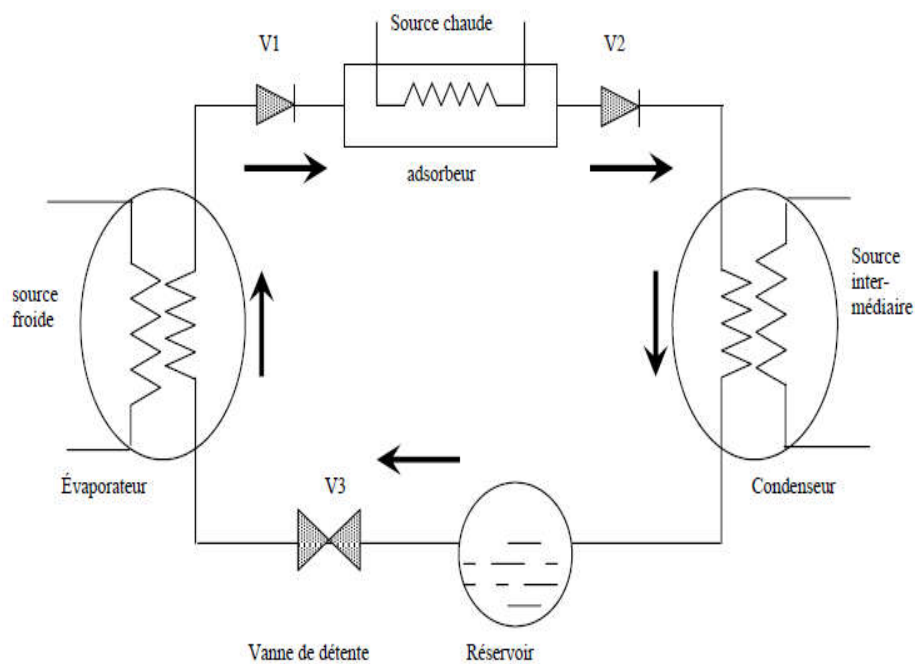


Figure 1.2. Schéma d'une machine frigorifique solaire à adsorption [24].

1.9.2. Cycle frigorifique à adsorption

La machine frigorifique à adsorption fonctionne par cycle. La figure 1.3 représente le trajet thermodynamique de base d'une telle machine dans le diagramme de Clapeyron ($\ln P$, $-1/T$). Ce cycle dit idéal, représente l'évolution de l'état de mélange adsorbant/adsorbé contenu dans l'adsorbeur [24].

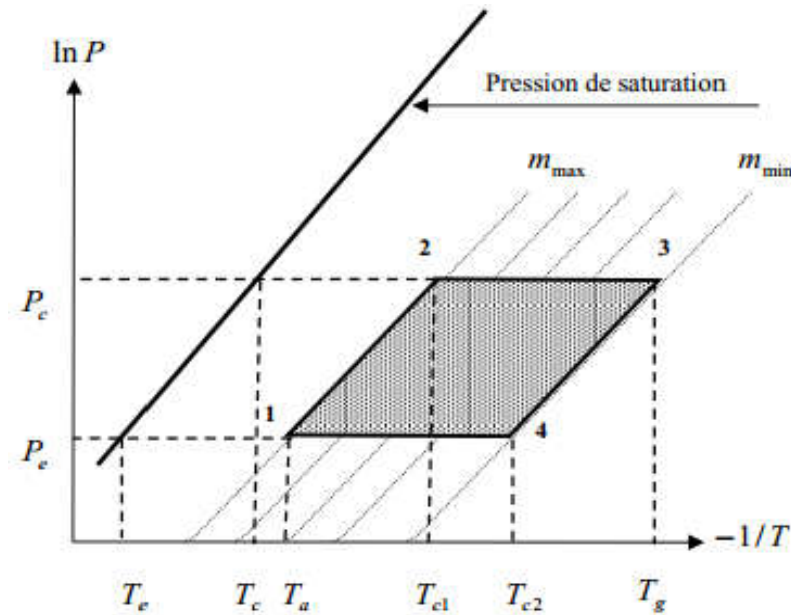


Figure 1.3. Diagramme de Clapeyron pour une machine frigorifique à adsorption [29].

1.9.3. Définition des procédés thermochimiques d'adsorption

Le principe de fonctionnement d'un cycle thermodynamique adsorbant-réfrigérant représenté pour un cycle idéal, aux transferts de masse et de chaleur. Dans le diagramme de Clapeyron qui se compose de quatre phases : Deux isobares et deux isostériques.

- ❖ Phase isobare : La pression constante, la masse adsorbée en fonction de la température $m = f(P)$ (figure 1.4).
- ❖ Phase isostères : La masse adsorbée constant, et la pression en fonction de la température $P = f(T)$ (figure 1.5) [2].

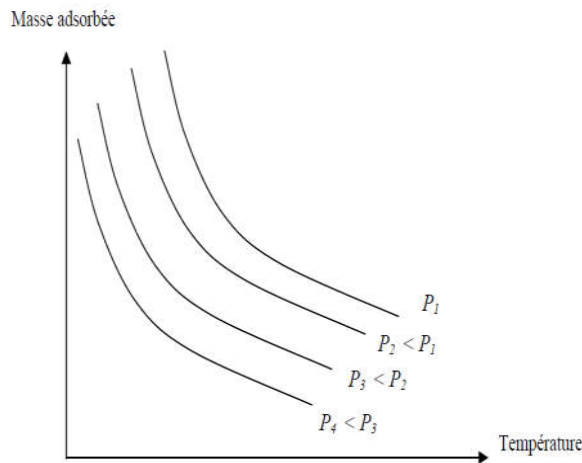


Figure 1.4. Allure schématique des isobares d'adsorption [24].

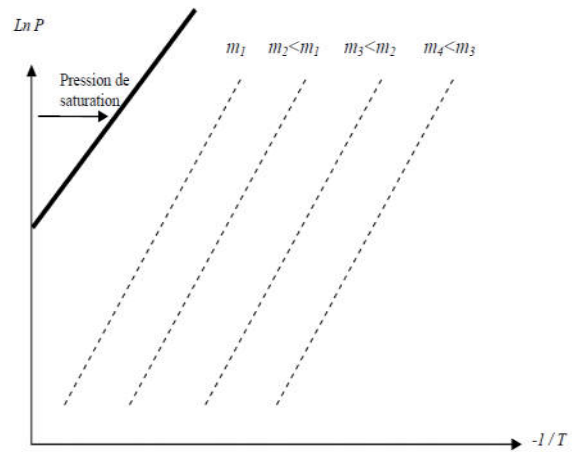


Figure 1.5. Schéma d'un réseau d'isostère d'adsorption [24].

1.9.3.1. Phase de chauffage

a. Phase de chauffage isostérique (7h-10h)

Au début du cycle (point 1), le mélange adsorbant/adsorbat est à sa température minimale T_a (température d'adsorption) et à la pression P_e (pression d'évaporation) ; à ce moment, l'adsorbeur est isolé. Sous l'effet de chauffage, la pression et la température du mélange augmentent, tandis que la masse totale du réfrigérant adsorbée reste constant e le long de la transformation ($1 \rightarrow 2$) et égale à m_{max} . Cette phase de pressurisation s'achève dès que la pression devient égale à celle qui règne dans le condenseur P_c (point 2). La température atteinte est dite température seuil de désorption T_{c1} [30].

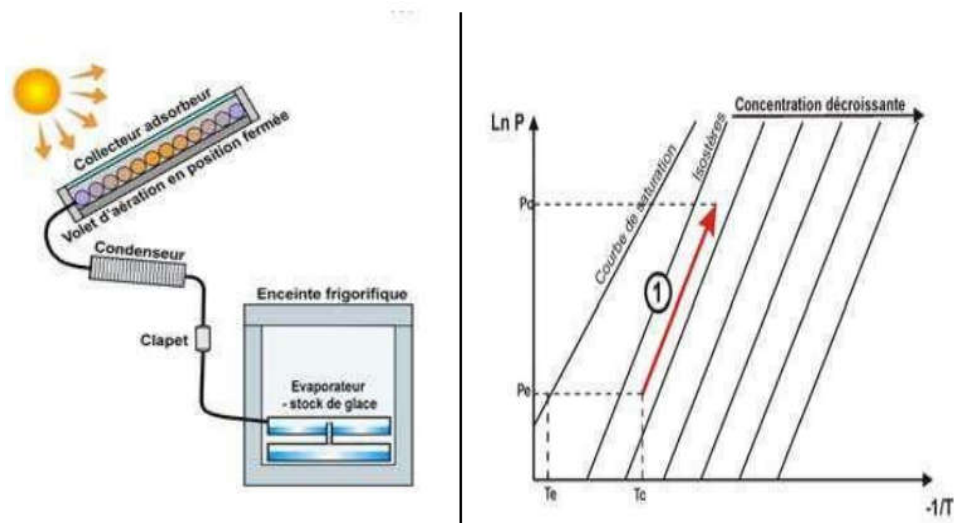


Figure 1.6. Phase de chauffage isostérique [31].

b. Phase de chauffage de désorption-condensation (10h-16h)

Cette phase commence lorsque la pression du mélange dans l'adsorbeur atteint la pression de condensation P_c (pression de saturation correspondante à la température de condensation), l'adsorbeur est mis en communication avec le condenseur et la désorption du frigorigène commence, qui se condense dans le condenseur par la suite. L'adsorbeur est alors en haute pression et suit l'isobare imposée par le condenseur. Tout en continuant le chauffage, la température du mélange dans l'adsorbeur augmente jusqu'à la température maximale T_g (température de régénération) au point 3, fixée pour le cycle correspondant. Cette phase est généralement appelée génération car c'est celle qui rend l'adsorbeur propice à une nouvelle phase de production frigorifique [30].

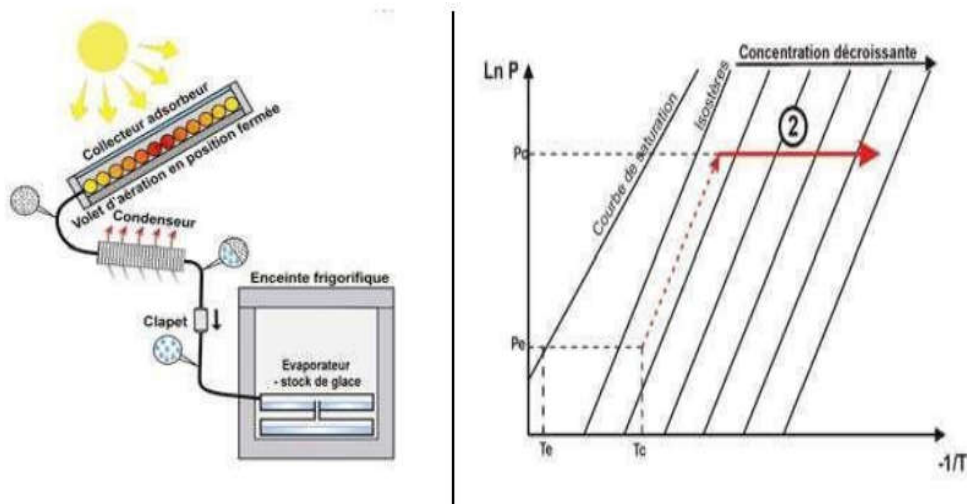


Figure 1.7. Phase de chauffage de désorption [31].

1.9.3.2. Phase de refroidissement

a. Phase de refroidissement isostérique

Par opposition à la première phase, le refroidissement du mélange adsorbant/adsorbat commence au point 3, où la température et la pression diminuent jusqu'à ce que la pression devienne égale à celle qui règne dans l'évaporateur. La température atteinte est dite température seuil d'adsorption T_{c2} (point 4). La masse totale du fluide adsorbé reste constante dans cette phase et est égale à m_{\min} [30].

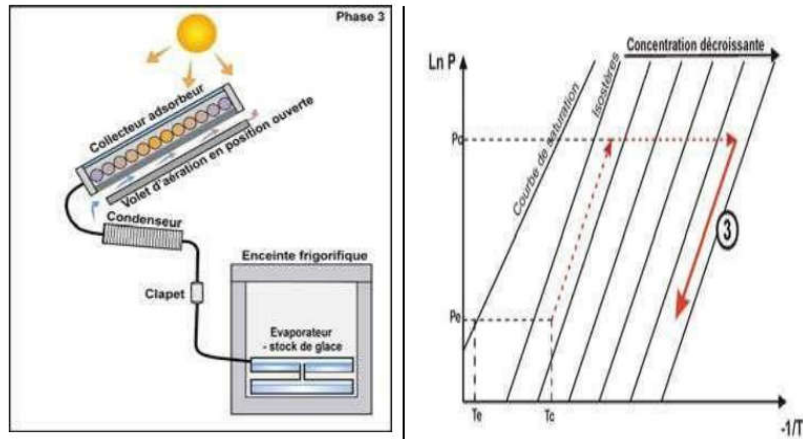


Figure 1.8.Phase de refroidissement isostérique [31].

b. Phase de refroidissement d’adsorption-évaporation (production du froid)

Cette phase est la phase motrice du cycle, pendant laquelle le froid est produit. Au point 4, commence l’évaporation du réfrigérant en produisant le froid dans l’évaporateur. La vapeur produite s’adsorbe de nouveau dans l’adsorbent, jusqu’à ce que la température du mélange adsorbant/adsorbat devienne minimale T_a , fixée pour le cycle correspondant.

Durant la transformation (4→1), le système suit l’isobare imposée par l’évaporateur, et qui correspond à la pression de saturation du réfrigérant à la température d’évaporation. À ce moment, la machine est prête pour un nouveau cycle.

Le cycle thermodynamique est totalement défini par les quatre températures de fonctionnement. La conception et les choix technologiques des machines frigorifiques à adsorption sont guidés par la volonté d’une optimisation de ce quadruplet de température. Vu l’alternance des phases (désorption-condensation et évaporation-adsorption), l’évaporation n’a lieu que pendant une partie du cycle, c’est pourquoi ce cycle est appelé intermittent. Cette intermittence est synchronisée avec celle de la source énergétique solaire [30].

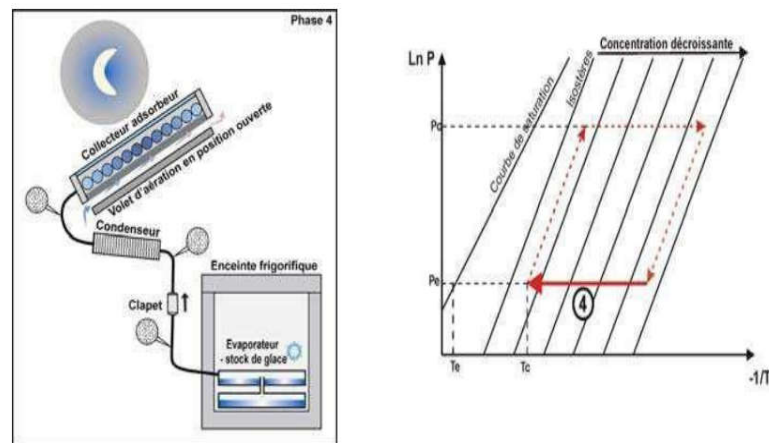


Figure 1.9.Phase de refroidissement d’adsorption [31].

1.9.4. Coefficients de performance thermique d'une machine frigorifique à adsorption

Dans le cadre de l'optimisation de la machine, une étude thermodynamique de fonctionnement sera discutée. Le modèle qui sera développé dans cette partie est un modèle statique, basé sur l'utilisation des équations d'état (adsorbant/adsorbat) à l'équilibre thermodynamique. Il ne tient compte ni des effets de la cinétique d'adsorption, ni des différences de température ou de pression dues aux transferts de chaleur et de masse (c'est-à-dire que la température, la pression et la masse adsorbée sont supposées uniformes) et que la condensation et l'évaporation s'effectuent à température constante. On néglige ainsi, l'effet des pertes thermique associées au chauffage de l'adsorbent.

L'efficacité de la machine est traduite par le coefficient de performance thermique COP_{th} . Ce coefficient est égal au rapport entre l'énergie thermique prélevée au niveau l'évaporateur (énergie absorbée à l'évaporateur) et l'énergie utilisée pour le fonctionnement de la machine (énergie fournie au compresseur), il est donné par l'équation suivante [32] :

$$COP_{Th} = \frac{Q_f}{Q_c}$$

Q_f : est la production frigorifique ou la quantité de froid produite à l'évaporateur.

Q_c : est la quantité de chaleur fournie à l'adsorbent.

Le COP th calculé dans cette partie est un COP thermodynamique, c'est-à-dire qu'il prene en compte les bilans sur l'adsorbant, l'adsorbat et les parties métallique de l'adsorbent. Mais, le COP_{th} réel d'un tel cycle tient compte des bilans thermiques sur l'adsorbent et sur les différents organes de la machine frigorifique à adsorption (condenseur et évaporateur).

1.10. Avantage et inconvénients des machines à adsorption

1.10.1. Avantage

Les machines frigorifiques à adsorption présentent comme avantages principaux :

- L'absence de compression mécanique, donc pas de vibrations et de bruits.
- La possibilité d'utiliser une énergie calorifique disponible et d'éviter ainsi la consommation électrique du compresseur. Donc, ce sont des machines poly-énergie (Brûleur du propane, résistance électrique, énergie solaire, ...etc.).
- La parfaite autonomie. Le procédé classique des machines à adsorption opère avec un seul adsorbent, il présente certes l'avantage d'être simple technologiquement, ce qui lui confère les qualités de facilité d'entretien et de fiabilité dans le temps.
- L'intermittence du cycle de base associé à ces machines représente une caractéristique utile dans les applications solaires où l'énergie solaire n'est que discontinuée disponible. Ces machines sont donc parfaitement adaptables à cette énergie.
- Le fonctionnement intermittent permet de diminuer le nombre de composants du système.
- Des coûts de fonctionnement et d'entretien très réduits.
- La durée de vie de ces machines peut être longue, si l'on s'est prémuni contre la décomposition du frigorigène et contre les phénomènes de corrosion [2].

1.10.2. Inconvénients

Inconvénients Beaucoup d'inconvénients de ces machines sont devenus des obstacles pour la réelle mise en pratique globale du procédé et qui font actuellement l'objet d'études, nous citons :

- Le coefficient de performance thermique de ces machines est limité (< 0.5). Donc ce coefficient est plus faible que ceux des systèmes à compression et à absorption.
- Fortes puissances thermiques à évacuer vers l'extérieur.
- Basses pressions de vapeur avec les frigorigènes utilisés (eau et méthanol).
- Avec l'eau, l'impossibilité de produire du froid au-dessous de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Les performances du système de captation des machines frigorifiques solaires à adsorption sont particulièrement sensibles aux conditions environnementales (vent, température ambiante et rayonnement solaire), ce qui renforce le caractère aléatoire de la production frigorifique provenant du caractère fluctuant de l'énergie solaire.

La production discontinue de froid imposant un accumulateur externe pour le stockage de l'énergie. Cette solution permet de pallier la nature intermittente et aléatoire de l'énergie solaire, mais n'a pas encore reçu de succès économique satisfaisant. Le problème de discontinuité de production de froid peut être résolu en utilisant plusieurs adsorbants, ce qui augmente l'encombrement, le poids et le prix de la machine [2].

1.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques systèmes de production du froid solaire, et les différents composants d'une machine frigorifique solaire. Nous avons aussi vu les différents prototypes en fonction des couples de travail.

Chapitre 2

Description du dispositif expérimental

CHAPITRE 2 : Description du dispositif expérimental

2.1. Introduction

2.2. Description de la machine frigorifique à adsorption solaire

2.3. Assemblage des différents éléments de l'installation frigorifique solaire

2.4. Les sous-éléments

2.5. Opérations de vérification et de dégazage de l'installation frigorifique

2.6. Conclusion

2.1. Introduction

Le travail d'étude et de réalisation de la machine frigorifique proposée représente la suite du projet de fin d'étude d'ingénieur préparé par H.GUIREN et A. NESBAH et dirigé par le Pr. Adel BENCHABANE, soutenu en Juin 2011[1]. D'où ils ont fait une reproduction à travers une compréhension de la machine frigorifique solaire construite par le Dr. Abd el mousshel ERROUGANI, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Agdal, Rabat, Maroc, Juin 2007. Ils ont pu construire le socle supportant tous les éléments, la boîte en bois du capteur, la réalisation de l'évaporateur et le condenseur à base de tôle en acier galvanisé sans avoir assemblé le tous ou tester l'un d'eux. Après, durant les années universitaires 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018 et sous la direction du Dr. Kamel AOUES a repris le sujet. En 2017/2016, Amel GUERROUF a finis de réaliser tous les éléments de la machine [2]. L'année qui suit, Ayoub NOUADJI a essayé de trouver des solutions aux problèmes rencontrés [3].

Dans ce chapitre, nous allons présenter le banc d'essai expérimental réalisé ainsi que ses différents composants. Nous décrivons les différentes de modifications, des étapes de préparation de la machine frigorifique et des différentes expériences.

2.2. Description de la machine frigorifique à adsorption solaire

Une machine frigorifique à adsorption est un système thermodynamique fermé. Le circuit dans cette machine se trouve en dépression par rapport à l'atmosphère, l'adsorbeur a le même rôle du compresseur dans le cycle à compression de vapeur.

La machine frigorifique a été construite au niveau du hall technologique de l'université Mohamed Khider de Biskra. Cette machine est représentée dans la figure 2.1.



Figure 2.1 Machine frigorifique solaire à adsorption méthanol/charbon actif.

Notre machine frigorifique solaire à adsorption est constituée des composants suivant :

2.2.1. Le capteur (l'adsorbeur)

Durant les années précédentes, le capteur a été de forme parallélépipédique assemblé par soudage, figure 2.2. Cette technique a présenté des problèmes de fuites impossibles d'éliminer. Par conséquent, on a construit un nouveau capteur dit "tubulaire".



Figure 2.2. Capteur parallélépipédique remplacé.

❖ Préparations des tubes internes et externes

Le capteur tubulaire se compose de neuf (09) tubes en cuivre concentriques (deux tubes de différents diamètres concentriques). Le tube intérieur est en cuivre d'épaisseur 0.5 mm, de 16 mm de diamètre extérieur et une longueur de 800mm, figure 2.3. Ces tubes jouent le rôle de tamis qui emprisonnent les grains du charbon actif à l'intérieur des tubes et permettent le passage et l'entrée du gaz méthanol. Pour cette fin, nous avons perforé ces tubes de plusieurs trous de diamètre de 2 mm et d'une longueur de 700 mm, figure 2.4.

Les tubes extérieurs sont en cuivre d'épaisseur de 1 mm, de 42 mm de diamètre extérieur et d'une longueur de 700mm, figure 2.5.



Figure 2.3. Tubes internes.

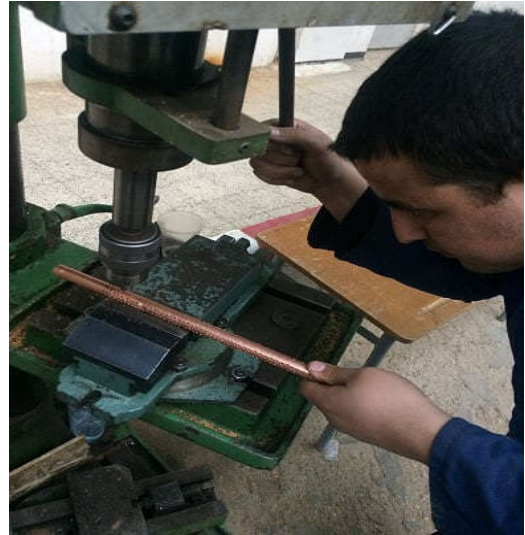


Figure 2.4. Opération de perforation des tubes internes.



Figure 2.5. Tube externe de 42 mm de diamètre.

❖ Assemblage des tubes

La formation de la forme tubulaire a été grâce aux éléments d'assemblage suivant :

- Pièces(1) de raccordement et de réduction entre deux tubes en cuivre (diamètres 42/28), figure 2.6,
- Pièces(2) de raccordement et de réduction entre deux tubes en cuivre (diamètres 28/16), figure 2.6,
- Manchons(3) en cuivre de 28 mm diamètre extérieur ; pour assembler les pièces (1) et (2), la figure 2.6,
- Coude femelle-femelle 90° (4) en cuivre et Té égal(5) en cuivre (diamètre 16 mm), figure 2.7,



Figure 2.6. Pièces (1), (2), (3) de raccordement.



Figure 2.7. Les coudes femelle-femelle 90° (4) et Té égal (5).

Les tubes et les différentes pièces d'assemblage ont été fixés les uns sur les autres par soudage au mélange oxygène acétylène, figure 2.8.



Figure 2.8. Procédé de soudage.

Pour pouvoir remplir le charbon actif entre les deux tubes (42 et 16 mm), nous avons d'abord soudé un côté, figure 2.9. Ensuite, nous avons rempli le charbon actif par l'autre côté. Où chaque vide entre les deux tubes s'est rempli d'une quantité d'environ 466 g. Par conséquent, les neuf tubes ont été remplis d'une quantité d'environ 4194 g.



Figure 2.9. Soudage du premier coté et remplissage de charbon actif.

Et à la fin du remplissage du charbon actif, nous avons assemblé l'ensemble des tubes par soudage, figure 2.10. Puis le système tubulaire peint en noir mat, figure 2.11.



Figure 2.10. Les neufs tubes assemblés.



Figure 2.11. Le processus de coloration.

Pour favoriser le chauffage du capteur le jour, celui-ci est placé dans un boîtier carré couvert d'une plaque en verre afin de produire l'effet de serre et réduire les pertes thermiques du au vent, figures 2.12.



Figure 2.12. Fixation de la couverture transparente.

2.2.2. L'évaporateur

L'évaporateur est un échangeur de chaleur qui permet de vaporiser le fluide (adsorbat). Le fluide frigorigène passe progressivement de l'état liquide à l'état gazeux. L'évaporateur est un parallélépipède de volume de 11 litres ; il est constitué de 4.4 m de tube carré en inox, la quantité de méthanol introduite initialement dans l'évaporateur est de 3 litres [32], figure 2.13.

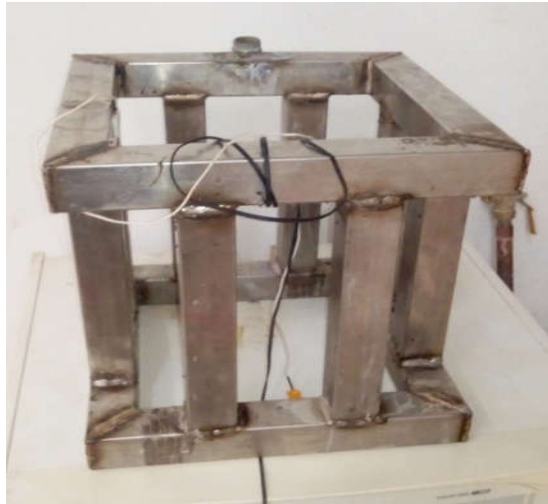


Figure 2.13. L'évaporateur.

2.2.3. la chambre froide

Une chambre froide d'un ancien réfrigérateur classique (Figure 2.14), contient l'évaporateur qui permet son refroidissement pendant la phase de production de froid, pour minimiser le transfert de chaleur entre l'ambiance et la chambre froide, cette dernière doit être isolée de quelques centimètres en utilisant 4 cm de polystyrène [32].



Figure 2.14. La chambre froide.

2.2.4. Le condenseur

Le condenseur ou l'échangeur à air est refroidi par convection libre, ce dernier liquéfie progressivement le gaz de l'état gazeux à l'état liquide. Le condenseur est positionné dans l'installation frigorifique solaire de manière que le condensat s'écoule, par l'un des orifices, facilement sous l'effet de la gravité, vers l'évaporateur.

Pour les nombreux problèmes rencontrés dans le condenseur précédent, nous avons simplifié la configuration du condenseur. Un tube en cuivre d'une épaisseur de 1 mm de 26 mm diamètre intérieur et d'une longueur totale de 5 m (la Figure 2.15). A l'aide du feu, nous avons chauffé le tuyau afin de lui donner la bonne forme qui nous est utile.



Figure 2.15. Le condenseur.

2.3. Assemblage des différents éléments de l'installation frigorifique solaire

Nous avons pu connecter les trois parties principales de l'installation c.à.d. le capteur, le condenseur et l'évaporateur. L'assemblage a été fait comme suit :

- Relier le capteur au condenseur par la vanne V2 (entrée du condenseur),
- Relier le condenseur à l'évaporateur par la vanne V3 (sortie du condenseur),
- Relier l'évaporateur au capteur par la vanne V1 (sortie de l'évaporateur),
- Relier l'évaporateur à un réservoir externe par la vanne 4 qui sert à emmagasiner le méthanol lors de son introduction dans le circuit ou le contraire.

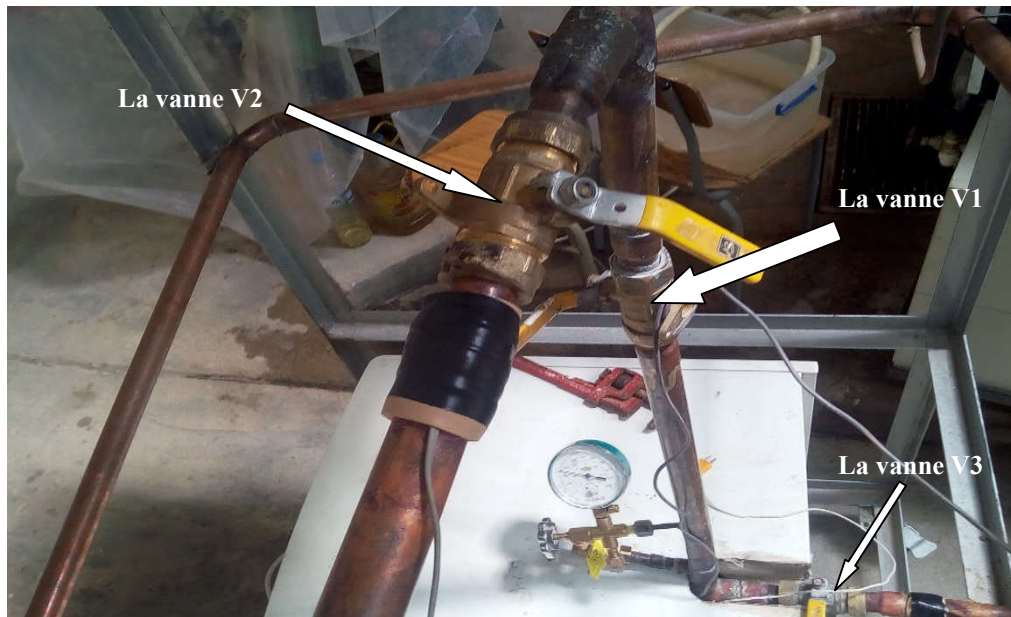


Figure 2.16. Emplacements des vannes.

2.4. Les sous-éléments

- Le réservoir : pour stocker le fluide frigorigène, figure 2.17,
- Le vaccumètre : pour mesurer la pression du sous vide, figure 2.18,
- Pompe à vide : pour vider le circuit, figure 2.19,



Figure 2.17. Le réservoir.



Figure 2.18. Le vaccumètre.



Figure 2.19. Pompe à vide.

2.5. Opérations de vérification et de dégazage de l'installation frigorifique

Notre circuit frigorifique est un circuit fermé et par conséquent, il exige une très bonne vérification aux fuites. Aussi, la marche de la machine et la production du froid nécessite l'extraction de l'air du circuit frigorifique, et par conséquent, mettre le circuit sous vide.

Pour répondre à ces deux conditions, nous avons procédé à deux opérations :

- Vérification de la fuite dans chaque élément puis la machine tout entière,
- Dégazage de l'air du circuit frigorifique [27].

Au début, nous avons essayé de réparer le vieux capteur (forme parallélépipédique) en traquant les fuites et en les réparant par soudage, mais nous ne pouvions pas le faire et il y avait des distorsions (figure 2.20), ce qui nous a amené à le changer par un autre de forme tubulaire, figure 2.10.



Figure 2.20. Vieux capteur déformé.

Nous avons également essayé de réparer l'ancien condensateur par soudage, où le feu a provoqué de grandes distorsions et nous n'avons pas pu le réparer (figure 2.21), donc nous avons décidé de le remplacer par un nouveau condenseur plus simple, figure 2.15.



Figure 2.21. L'ancien condensateur déformé.

Après avoir assemblé tous les éléments de la machine frigorifique solaire, nous avons commencé à vérifier le capteur, le condenseur et l'évaporateur chacun à part grâce aux vannes d'isolement. Nous avons aussi monté des manomètres de pression dans le capteur et le condenseur.

Au début et à l'aide d'un compresseur d'air, nous avons élevé la pression dans le capteur et le condenseur et l'évaporateur, puis vérifié l'existence de fuite. Nous avons remédié les fuites et assuré une bonne étanchéité dans les endroits de connexion.

On décharge le circuit fermé de la machine frigorifique solaire par une pompe à vide, on remarque l'indicateur du vaccumètre se déplace jusqu'à son minimum.

Par la suite, nous avons procédé à nouveau à une dernière vérification de toute l'installation et éliminer toute présence de fuite.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu exposer toutes les étapes de fabrication des différents éléments constituant notre installation frigorifique solaire. Ainsi que la vérification et le dégazage du circuit frigorifique solaire.

Chapitre 3

Résultats et discussions

Chapitre3 :**Résultats et discussions**

1.1. Introduction

1.2. Résultats expérimentaux

1.3. Données météorologiques du site

1.4. Evolution de pression du capteur

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposerons les différents résultats enregistrés lors des expériences menées au hall technologique, Université Mohamed Khider de Biskra.

Le cycle de production du froid par le réfrigérateur solaire à adsorption se fait en 24 heures. Le début de ce cycle pour nos expériences est vers le coucher du soleil à environ de 20 h.

3.2. Résultats expérimentaux

Les expériences et la prise de mesures des différents paramètres tels que le rayonnement solaire incident et les températures de l'ambiance et celle des différents points qui représentent les composants de notre installation frigorifique solaire ont été enregistrées durant le jour 15/04/2019. Durant ce jour, nous avons pu achever trois cycles complets du circuit du méthanol (adsorption/désorption).

3.2.1. Description de l'installation avant le début des expériences

Avant le début des expériences vers la soirée, l'installation se trouve à l'état suivant (état initial), figure 3.1 :

- Le méthanol se trouve à l'intérieur de l'évaporateur,
- Toutes les vannes, V1, V2 et V3 sont fermées,
- Les trappes de refroidissement du capteur sont ouvertes.

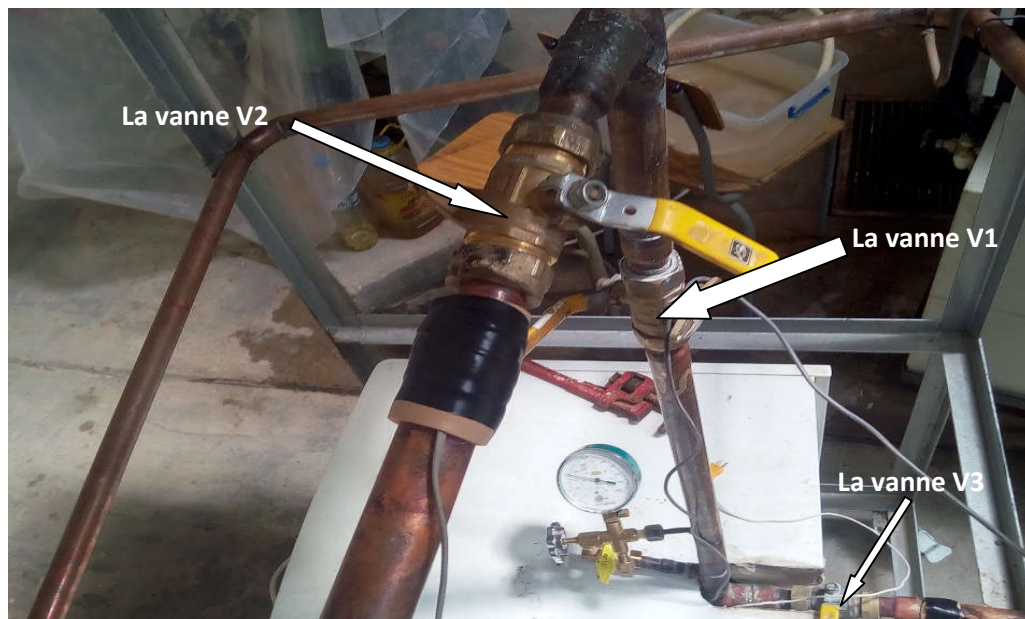


Figure 3.1. Installation Frigorifique solaire.

3.2.2. Début et déroulements des expériences

Au environ de 20heures, on ouvre la vanne V1 (évaporateur/adsorbeur), le méthanol commence à s'évaporer. Cette vapeur remonte vers le capteur d'où le charbon actif commence la phase d'adsorption. Cette phase dure toute la nuit jusqu'au lever du soleil. Le phénomène d'évaporation fait réduire la température de la chambre froide (phase de production du froid).

Vers 07h30, on ferme la vanne V1 et les trappes de refroidissement du capteur ; c'est le début de la phase de réchauffement du capteur exposé aux rayonnements du soleil.

Au environ de 10h30 et une fois la température de l'adsorbeur a atteint celle de la désorption du méthanol, on ouvre la vanne V2 (adsorbeur/condenseur) d'où la vapeur du méthanol commence à s'écouler vers le condenseur (sous l'effet de la différence de pression). C'est la phase de désorption.

Vers 18h00, on ferme la vanne V2 et on enlève les trappes de refroidissement du capteur.

Vers 19h00, on ouvre la vanne V3 (condenseur/évaporateur). Le méthanol liquéfié par le condenseur s'écoule vers l'évaporateur sous l'effet de la pesanteur. Une demi-heure après l'ouverture de la vanne V3, on la referme. Le cycle du froid est terminé.

3.3. Données météorologiques du site

3.3.1. Variation du rayonnement solaire et de la température ambiante

La figure 3.2 illustre la variation du rayonnement solaire incident ainsi que la température ambiante ; qui caractérisent la journée du 15/04/2019. Les données du rayonnement solaire incident enregistrées sont prises par rapport à un plan incliné d'un angle égal à 34.8° (latitude du site de Biskra), qui représente l'inclinaison du capteur solaire.

Lajournée se caractérise par un ciel clair. On remarque que l'intensité a atteint un maximum de 1054 W/m^2 et une moyenne journalière de 561 W/m^2 . On a enregistré également une variation de la température ambiante qui varie entre 11°C et 32.4°C (figure 3.2), d'une moyenne de 21°C . En fin de journée, le rayonnement solaire est à son minimum, la température du lit d'adsorbant diminue progressivement suivant la température ambiante.

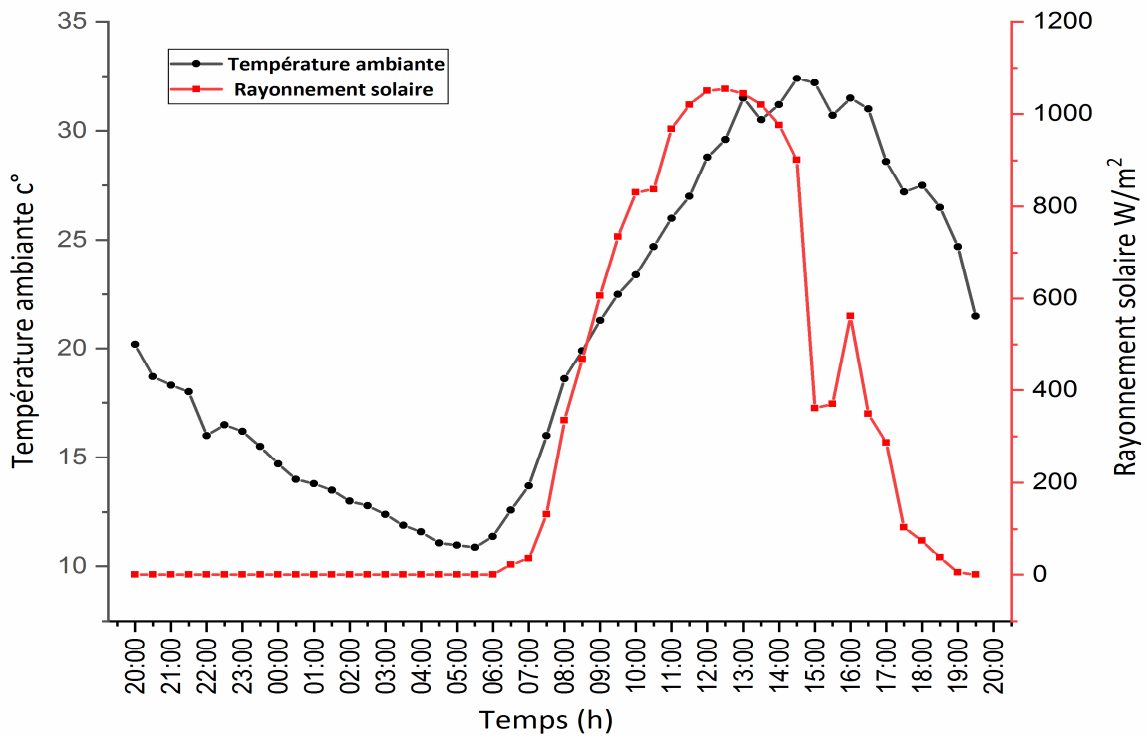


Figure 3.2. Evolution du rayonnement solaire et de la température ambiante de jour de test.

3.3.2. Variation de la vitesse du vent

Dans la figure 3.3, nous exposons la variation de la vitesse du vent durant la journée du 15/04/2019 du test. La vitesse du vent est un facteur très important qui influe sur l'échange thermique par convection naturelle sur la couverture transparente. Nous remarquons durant cette journée que la vitesse du vent a été d'une moyenne de 0.87 m/s.

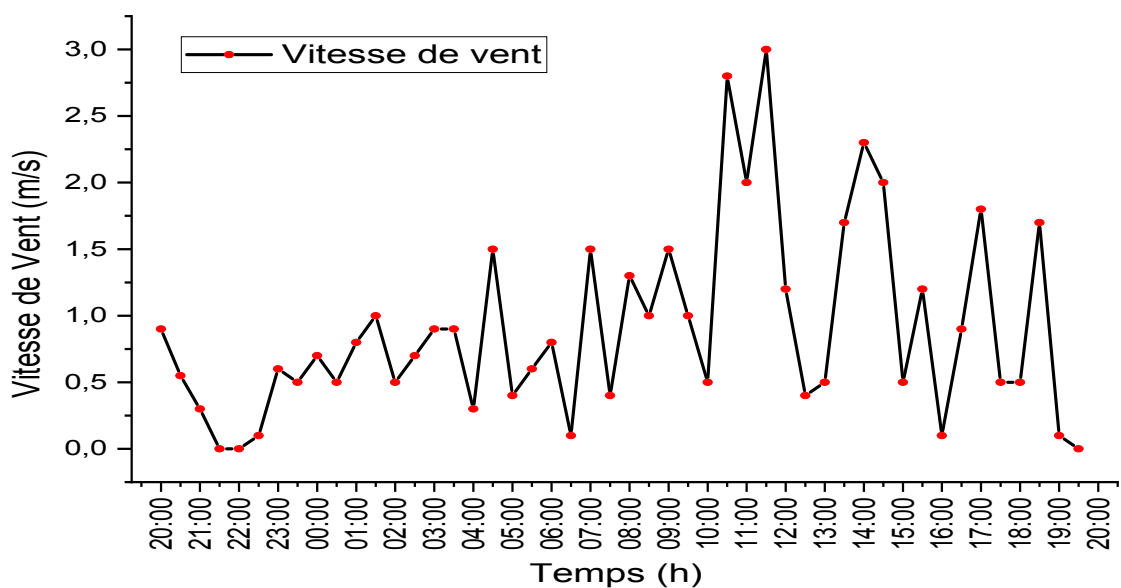


Figure 3.3. Variation de la vitesse du vent.

3.4. Les Températures des différents éléments de l'installation

3.4.1. Evolution de la température l'adsorbeur

La figure 3.4 illustre l'évolution de la température de l'adsorbeur du 14 au 15 avril 2017. Durant le jour, la température de l'adsorbeur augmente jusqu'à atteindre son maximum de 98 °C vers 13h30, et pour la face arrière elle a atteint son maximum de 77 °C vers 14h00. Après 13h00, la température de l'adsorbeur commence sa diminution jusqu'à son minimum, respectivement (face avant et arrière) vers 18h30, 25 °C et 24 °C. Après le coucher du soleil complet, on enlève l'isolation arrière du capteur pour accélérer le refroidissement de l'adsorbeur durant la nuit et favoriser la phase d'adsorption du méthanol par le charbon actif.

On remarque une légère perturbation vers 15h30 qui est dû essentiellement à celle enregistrée par le rayonnement solaire.

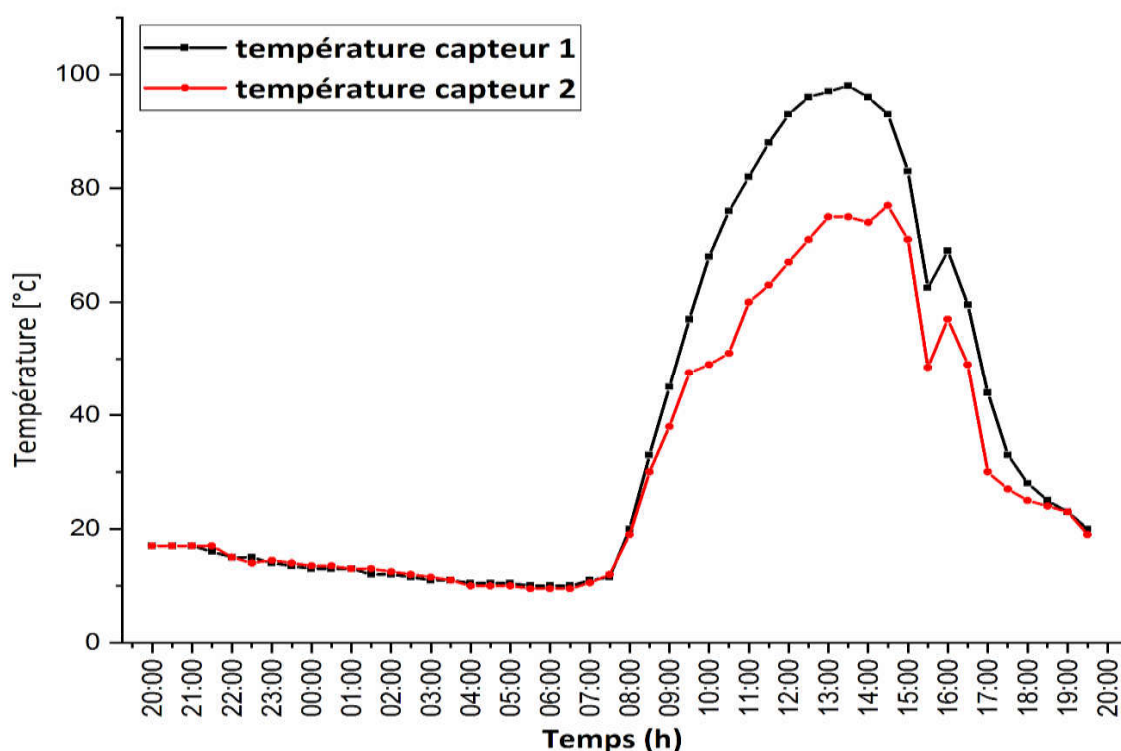


Figure 3.4 Evolution de la température de l'adsorbeur durant la journée de test.

3.4.2. Evolution des températures de l'évaporateur et celle de l'ambiance

La figure 3.5 illustre l'évolution de la température de l'évaporateur de la soirée du 14 au 15 avril ainsi que la température ambiante. Ces résultats traduisent la variation de la température de l'évaporateur durant tous le cycle de réfrigération (présence ou non de l'adsorbat ; méthanol à l'intérieur du circuit de l'évaporateur).

- Première tranche de mesure entre 20h00 jusqu'à 07h30

On remarque que la température de l'évaporateur diminue le long de la nuit de 17.5 °C à 9 °C, c.-à-d. d'une différence égale 8.5 °C. La même chose pour la température ambiante mais elle est inférieure à celle de l'évaporateur dont la valeur 20.2 °C à 16 °C.

- Deuxième tranche de mesure entre 7h30 jusqu'à 20h00

On remarque que la température de l'évaporateur augmente jusqu'à atteindre 22 °C, c.à.d. une augmentation de 13 °C. La même remarque pour la température ambiante qui a varié de 16.5°C à 26.5 °C, d'où une augmentation de 10 °C, qui est toujours supérieure à celle de l'évaporateur (la température ambiante commence à diminuer aux environ de 16h30).

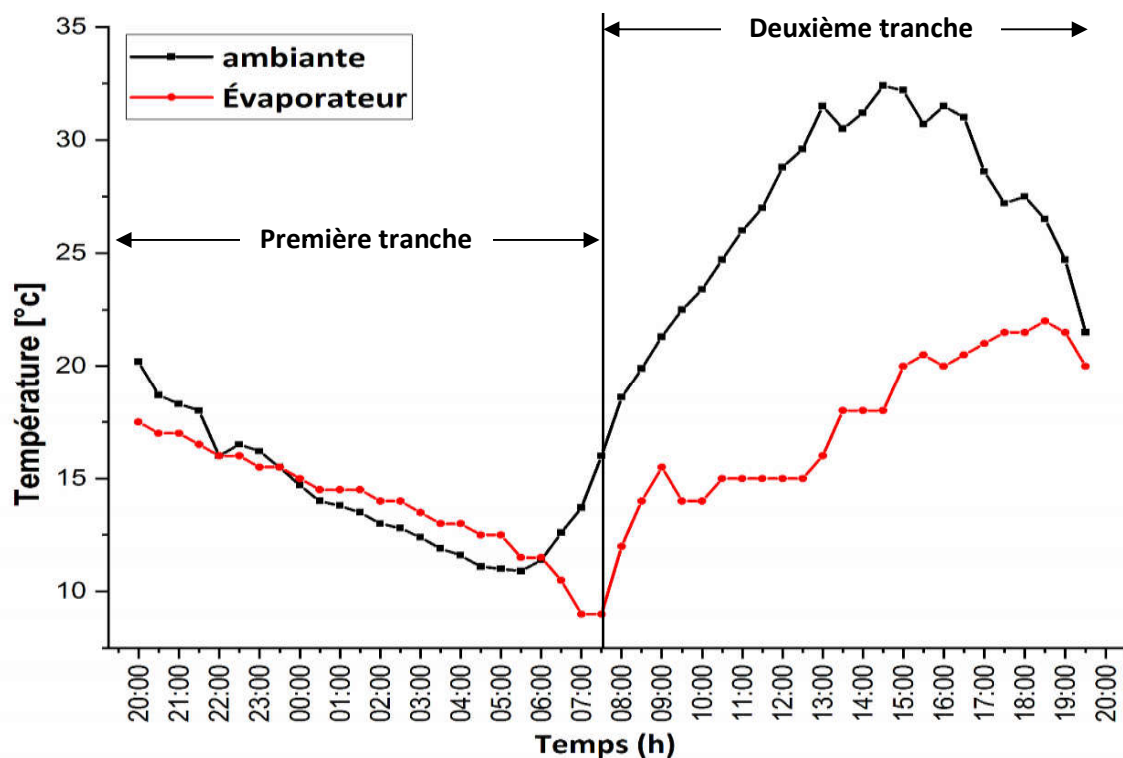


Figure 3.5. Variations la température de l'évaporateur et celle de l'ambiance.

3.4.3. Evolution des températures du condenseur et celle de l'ambiance

Après la désorption de l'adsorbat par le charbon actif qui a atteint la température de désorption $T_{dés}$ (température de saturation), on ouvre la vanne V2 (adsorbeur/condenseur). Le méthanol sous forme de vapeur et sous l'effet de la dépression, il commence à s'écouler vers le condenseur. Les vapeurs du méthanol se liquéfient tout en libérant une quantité de chaleur dite "chaleur de condensation, Q_c ", à une température T_c de condensation.

Cette phase de condensation commence après l'ouverture de la vanne 2, vers 10h30 jusqu'à la fermeture de la même vanne vers 17h30.

Ensuite, on laisse le méthanol dans le condenseur jusqu'à 19 heures du soir (phase détente). On prend les mesures de variation de la température du condenseur et celle l'ambiance, durant les deux phases de condensation et de détente (de 10 h30 à 19 h), figure 3.6.

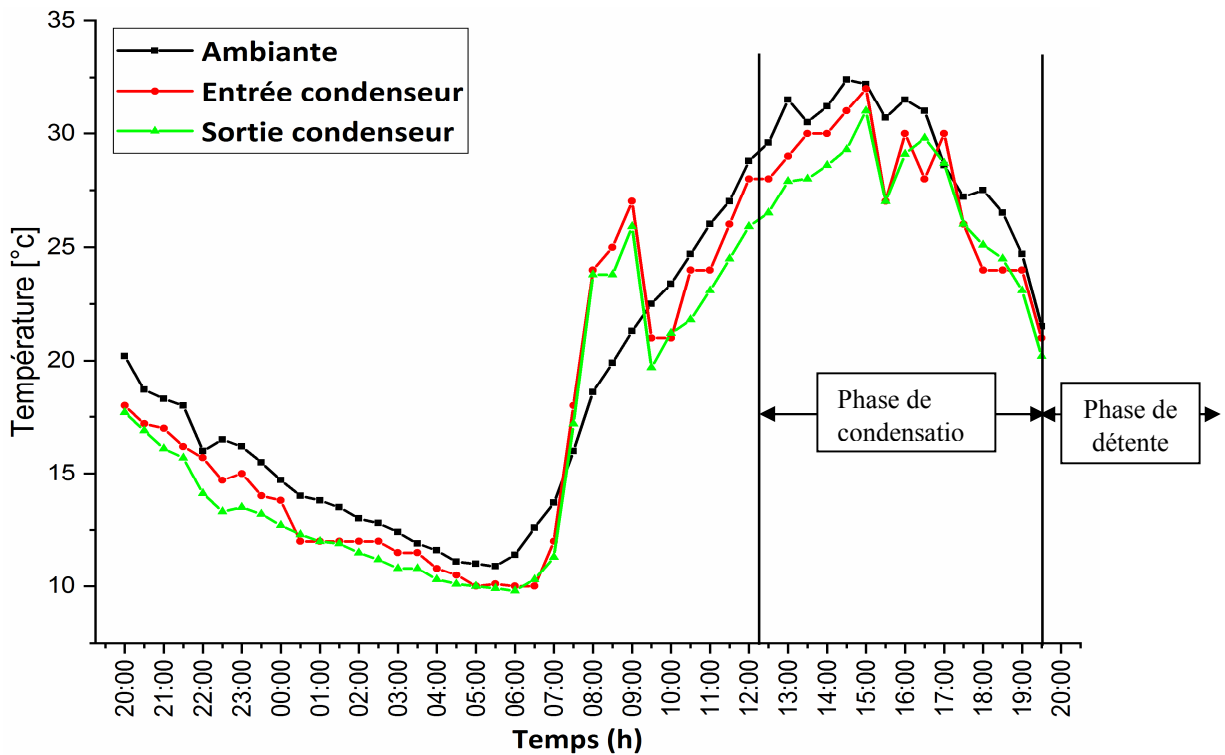


Figure 3.6. Variations des températures du condenseur et celle de l'ambiance

La figure 3.6 illustre les températures du condenseur et celle ambiante. On remarque que la température du condenseur augmente surtout dans la phase de condensation durant la journée de l'entrée à la sortie, respectivement, de 18 °C à 32 °C et 17.7°C à 29.8 °C, autrement dit une augmentation de 14 °C et de 12.1 °C. Le même cas pour la température ambiante qui a varié de 20.2 °C à 32.2 °C et 31 °C, d'où une augmentation de 12 °C et 11.2°C, qui est

toujours inférieure au condenseur. Après 17h00 (phase de détente), la température du condenseur diminue et reste inférieure à celle ambiante.

3.4.4. Evolution des pressions

La figure 3.7 montre la variation de la pression dans le capteur et l'évaporateur en fonction du temps. La pression a augmenté de la valeur minimale pour le capteur et l'évaporateur, respectivement, 160 et 150 mbar à la valeur maximale correspondante, respectivement, pour le capteur et l'évaporateur à 730, 145 mbar.

Vers 07h30, on ferme la vanne V1 (évaporateur/adsorbteur) et les trappes de refroidissement du capteur, Les pressions du capteur et évaporateur commencent à augmenter.

Au environ de 10h30, on ouvre la vanne V2 (adsorbteur/condenseur), diminution de la pression pour équilibrer entre le capteur et le condenseur. Après cela, Les pressions du capteur et de l'évaporateur commencent à augmenter.

La pression du capteur commence à diminuer jusqu'à atteindre son minimum. On remarque une légère perturbation vers 15h30 qui est dû essentiellement à celle enregistrée par le rayonnement solaire.

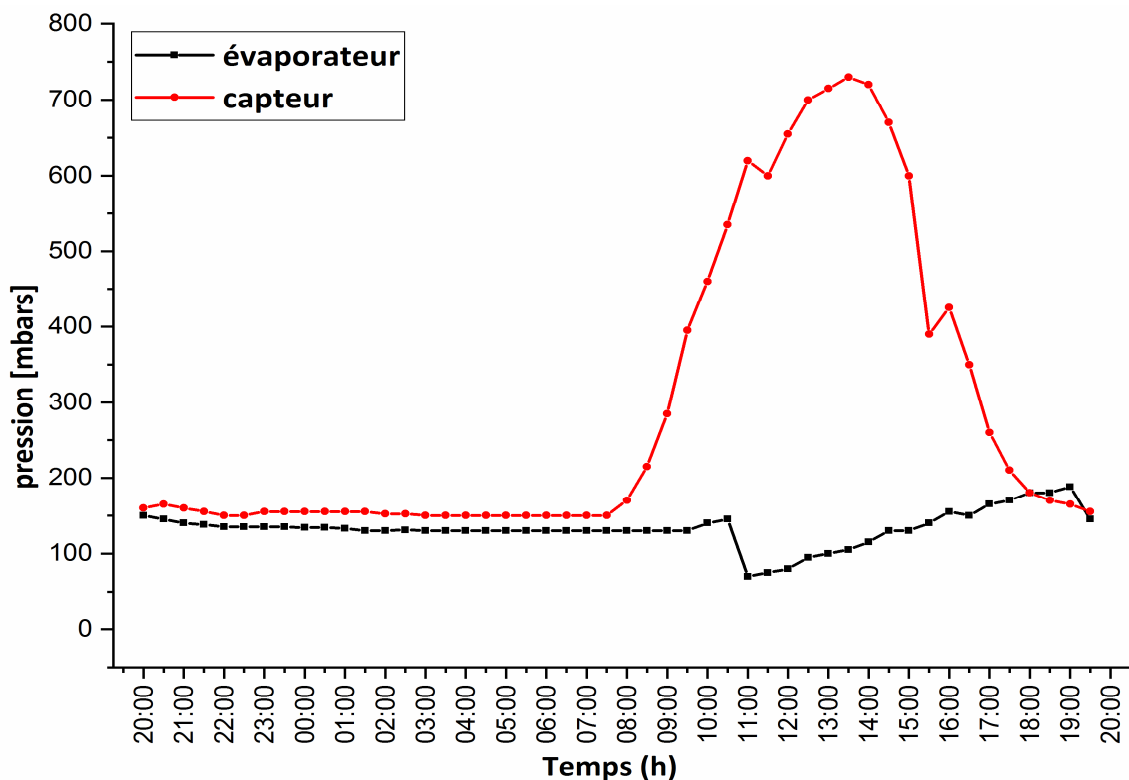


Figure 3.7. Variation des pressions du capteur et de l'évaporateur en fonction du temps.

Vers 18h, on ferme la vanne V2 et on enlève les trappes de refroidissement du capteur.

Vers 19h, on ouvre la vanne V3 (condenseur/évaporateur). On remarque une diminution de la pression pour équilibrer celle de l'évaporateur et du condenseur. Une demi-heure après l'ouverture de la vanne V3, on la referme.

Vers 20h00, on ouvre la vanne V1 (évaporateur/adsorbeur). la pression pour équilibrer entre capteur et l'évaporateur.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons réalisé et expérimenté une machine frigorifique solaire à adsorption utilisant comme couple de travail charbon actif/méthanol. L'objectif de ce travail était de tester l'exploitation des machines frigorifiques solaire dans la région de Biskra, pour cela un premier prototype a été fabriqué entièrement avec des matériaux locaux.

Pour cela, on a décomposé le travail en deux parties :

Dans la première partie et on se basant sur des travaux antérieurs (Amel Guerrouf (2017) [2], Ayoub Nouadji (2018) [3], Errougani (2007) [23]), nous avons pu réaliser cette installation frigorifique avec tous ces éléments tels que le capteur, le condenseur et l'évaporateur. Pour arriver à notre objectif, nous avons construit avec soin :

- 1- Un capteur/adsorbeur est de forme tubulaire qui à remplacer le capteur parallélépipédique. Il contient 4194 g de charbon actif,
- 2- Un condenseur/échangeur formé d'un tube cuivre d'une épaisseur de 0.5mm de diamètre extérieur de 28 mm et d'une longueur totale de 5 m,
- 3- Un évaporateur constitué de tube carré en inox d'épaisseur 2 mm et de 50 mm de diamètre intérieur. L'évaporateur a une longueur de 44 cm, une largeur de 40 cm et une hauteur de 40 cm,

Durant la phase d'expérimentation de la machine et analyse des résultats, on a observé au cours de nos expériences que :

- Pour les jours de bon ensoleillement la température maximale atteinte, par la face avant du capteur, est de l'ordre de 92°C. Pour la face arrière, elle est de l'ordre de 76 °C. Par conséquent, il ya un bon transfert de chaleur au sein du capteur.
- Les résultats enregistrées par l'évaporateur durant la phase de production du froid, on donné un refroidissement de l'ordre de 9°C, c.-à-d., un gain de 3°C par rapport à Ayoub Nouadji (2018)[3] et 5°C par rapport à Amel Guerrouf (2017) [2].

Recommandations et perspectives :

Durant la réalisation et l'expérimentation de cette machine, on a pu constater plusieurs difficultés, dont :

- 1- La mise en forme du capteur et les travaux de soudure étaient très difficile et très couteuses.
- 2- Le volume du capteur/adsorbeur est assez petit,
- 3- La chambre de froid a été sensible à la température ambiante.

Par conséquent, on a tiré des recommandations et perspectives pour la suite des travaux sur cette technologie :

- 1- Redimensionner l'isolation thermique de la chambre froide
- 2- Mettre dans la sortie du condenseur un élément de stockage du méthanol liquéfié avons son introduction dans l'évaporateur,
- 3- Utilisation des robinets spéciaux des installations frigorifiques pour éviter le risque de fuite

Références bibliographique

- [1] Guiren H., A. Nesbah, "Contribution à la conception et à la réalisation d'un réfrigérateur solaire par adsorption", PFE d'ingénieur, encadré par A. Benchabane, Université de Biskra, pp. 74 (soutenu en juin 2011).
- [2] AMEL GAROUF, Exploration du premier prototype de réfrigérateur solaire à adsorption charbon actif/méthanol dans la région de Biskra 2017.
- [3] AYOUB NOUADJI, Exploration du premier prototype de réfrigérateur solaire à adsorption charbon actif/méthanol dans la région de Biskra 2018.
- [4] Lu, Z.S., Wang, R.Z., 2014. Experimental performance investigation of small solar air-conditioning systems with different kinds of collectors and chillers. *Sol. Energy* 110, 7–14.
- [5] Berdja, M., Abbad, B., Yahi, F., Bouzeffour, F., Ouali, M., 2014. Design and realization of a solar adsorption refrigeration machine powered by solar energy. *Energy Proc.* 48, 1226–1235.
- [6] Lemmini, F., Errougani, A., 2005. Building and experimentation of a solar powered adsorption refrigerator. *Renew. Energy* 30, 1989–2003.
- [7] Hildbrand, Catherine, Dind, Philippe, Pons, Michel, Buchter, Florian, 2004. A new solar powered adsorption refrigerator with high performance. *Sol. Energy* 77, 311–318.
- [8] Pan, Q.W., Wang, R.Z., Lu, Z.S., Wang, L.W., 2014. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia. *Appl. Therm. Eng.* 72, 275–282.
- [9] Lu, Zisheng, Wang, Ruzhu, Xia, Zaizhong, 2013. Experimental analysis of an adsorption air conditioning with micro-porous silica gel–water. *Appl. Therm. Eng.* 50, 1015–1020.
- [10] Leite, Antonio Pralon Ferreira, Grilo, Marcelo Bezerra, Andrade, Rodrigo Ronelli Duarte, Belo, Francisco Antonio, Meunier, Francis, 2007. Experimental thermodynamic cycles and performance analysis of a solar-powered adsorptive icemaker in hot humid climate. *Renew. Energy* 32, 697–712.
- [11] Solmus, Ismail, Kaftanoglu, Bilgin, Yamal±, Cemil, Baker, Derek, 2011. Experimental investigation of a natural zeolite–water adsorption cooling unit. *Appl. Energy* 88, 4206–4213.
- [12] Li, C., Wang, R.Z., Wang, L.W., Li, T.X., Chen, Y., 2013. Experimental study on an adsorption icemaker driven by parabolic trough solar collector. *Renew. Energy* 57, 223–233.

- [13] Yan, T., Li, T.X., Li, H., Wang, R.Z., 2014. Experimental study of the ammonia adsorption characteristics on the composite sorbent of CaCl₂ and multi-walled carbon nanotubes. *Int. J. Refrig.* 46, 165–172.
- [14] Wang, Dechang, Zhang, Jipeng, Yang, Qirong, Li, Na, Sumathy, K., 2014. Study of adsorption characteristics in silica gel–water adsorption refrigeration. *Appl. Energy* 113, 734–741.
- [15] Luo, Huilong, Wang, Ruzhu, Dai, Yanjun, 2010. The effects of operation parameter on the performance of a solar-powered adsorption chiller. *Appl. Energy* 87, 3018–3022.
- [16] Chang, W.S., Wang, C.C., Shieh, C.C., 2009. Design and performance of a solar-powered heating and cooling system using silica gel/water adsorption chiller. *Appl. Therm. Eng.* 29, 2100–2105.
- [17] Wang, D.C., Xia, Z.Z., Wu, J.Y., Wang, R.Z., Zhai, H., Dou, W.D., 2005. Study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction. *Int. J. Refrig.* 28, 1073–1083.
- [18] Lu, Zisheng, Wang, Ruzhu, Xia, Zaizhong, Gong, Lixia, 2013. Experimental investigation adsorption chillers using micro-porous silica gel– water and compound adsorbent–methanol. *Energy Convers. Manage.* 65, 430–437.
- [19] Zhao, Huizhong, Zhang, Min, Zhenyan, Liu, Yanling, Liu, Xiaodong, Ma, 2008. Mechanical and experimental study on freeze proof solar powered adsorption-cooling tube using active carbon/methanol working pair. *Energy Convers. Manage.* 49, 2434–2438.
- [20] Hamdeh, Nidal H. Abu, Al-Muhtaseb, Mutaz A., 2010. Optimization of solar adsorption refrigeration system using experimental and statistical techniques. *Energy Convers. Manage.* 51, 1610–1615.
- [21] El Fadar, Abdellah, 2015. Thermal behavior and performance assessment of a solar adsorption cooling system with finned adsorber. *Energy*, 1–11.
- [22] Ji, Xu, Li, Ming, Fan, Jieqing, Zhang, Peng, Luo, Bin, Wang, Liuling, 2014. Structure optimization and performance experiments of a solar powered finned-tube adsorption refrigeration system. *Appl. Energy* 113, 1293–1300.

- [23] A. Errougani, fabrication et expérimentation d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif- méthanol dans le site de Rabat, Thèse de doctorat d'état, université Mohammed V, pp. 128, 2007.
- [24] W.Chekirou, Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption, Thèse de doctorat, Université Mentouri 2008.
- [25] M.Chahid, contribution à l'étude des machines thermiques à adsorption, thèse de troisième cycle, 1985, I.N.P.L, Nancy France.
- [26] Hamza M.B A, Etude Expérimentale de Production Frigorifique par Adsorption Solide:Application à la Conception d'une Plateforme de trigénération à partir de Biomasse en Milieu Rural ,thèse magister,UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA,Algérie,2011.
- [27] Billel. M,Etude et analyse d'un système de production de froid par énergie solaire pour la climatisation, thèse magister, UNIVERSITE CONSTANTINE 1, Algérie, 2013.
- [28] Hebiche N.A,Etude des Performances d'un réfrigérateur solaire a adsorption, thèse master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, Algérie, 2017/2018.
- [29]<https://www.google.com/search?q=diagramme+de+clapeyron+pour+une+machine+frigorifique+%C3%A0+adsorption&tbm=isch&source=univ&sa=X&ved=2ahUKEwiI9-HtgZTiAhURxYUKHRxvB0cQsAR6BAgJEA#imgrc=6iTskgB2aqdt3M>: 12/05/2019
- [30] B. N Etude de la performance d'une machine frigorifique à adsorption alimentée par l'énergie solaire, 2016.
- [31] Hildbrand Catherine et al, A new solar powered adsorption refrigerator with high performance, Solar Energy, Volume 77, Issue 3, September 2004
- [32] E.Passos, Etude des couples charbon actif – méthanol et de leur application à la réfrigération solaire PhD. Thèses, fédéral Polytechnique collège of Lausanne, Switzer land 1986.

Résumé

Ce projet de fin d'étude "master" présente l'étude au département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et de la Technologie à l'université Mohamed Khider, Biskra d'un premier prototype de réfrigération solaire à adsorption. Cette installation frigorifique qui utilise l'énergie solaire comme apport énergétique de fonctionnement, se base sur le phénomène adsorption/désorption. Utilisant le charbon actif/méthanol comme couple de travail. Nous avons remplacé le capteur de forme parallélépipédique avec un nouveau capteur de forme tubulaire, et aussi le condenseur. Ce procédé exécute un cycle par 24h. Il se décompose en deux étapes : i) La 1^{ère} étape se déroule du tout la nuit (phase de production du froid), ii) la 2^{ème} étapes se déroule du tout la journée (phase de désorption et de condensation). Un nombre de tests sur cette machine ont été réalisés dans les conditions climatiques de la région. Une production du froid qui a pu atteindre 10 °C à l'intérieur de La chambre froide. Les résultats enregistrés s'avèrent très motivants, me température de avec une diminution respectivement de 3 °C et 5 °C par rapport aux travaux de A. NOUADJI et A. GARROUF des années précédentes.

Mots clés : Thermodynamique, machine frigorifique solaire, adsorption, capteur solaire tubulaire, charbon actif/méthanol

ملخص:

يبين هذا المشروع دراسة لنموذج أولي لجهاز تبريد يعمل بالطاقة الشمسية يركز على عملية الامتزاز، والذي تم انجازه بقسم الهندسة الميكانيكية، كلية العلوم والتكنولوجيا جامعة محمد خيضر بسكرة. هذا النظام التبريدي الذي يعتمد على الطاقة الشمسية لتشغيله، أساسا على مبدأ الامتزاز، باستعمال الكربون المنشط/ الميثانول كثنائي العمل. حيث قمنا بتغيير اللوح الشمسي متوازي المستطيلات بأخر جديد أنبوبي، واستبدلنا أيضا المكثف. هذه العملية تنفذ دورة واحدة في 24 ساعة و قسمت إلى خطوتين : (i) الخطوة الأولى تكون في الليل (مرحلة إنتاج البرودة)، (ii) الخطوة الثانية تكون في نهار (مرحلة الامتزاز و التكتيف). وأجرينا مجموعة من التجارب لعلى الجهاز قد أجريت في شروط مناخية لمنطقة بسكرة. حيث سجلنا تبريد بنحو 10°C داخل غرفة التبريد. النتائج المسجلة جد محفزة لأننا استطعنا نزول في درجة البرودة عن أعمال سابقة 3 و 5 °C أيوب نواجي وأمال قروف على التوالي.

الكلمات المفتاحية: ديناميكا الحرارية، جهاز تبريد شمسي، الامتزاز، لاقط شمسي أنبوبي، الكربون المنشط/ميثانول